

特高压输电线路带电作业培训教材

# 基本知识分册

Basic Knowledge Volume

国家电网公司运维检修部 组编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

特高压输电线路带电作业培训教材

# 基本知识分册

Basic Knowledge Volume

国家电网公司运维检修部 组编

常州大学图书馆  
藏书章



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

为培养高素质技能人才队伍,进一步提高特高压输电线路的运维工作水平,加快打造一支素质过硬、业务精湛的特高压输电线路带电作业队伍,国家电网公司运维检修部统筹一批优秀培训、技术和技能专家,认真总结、提炼公司特高压输电线路带电作业科研、试验和生产宝贵经验,精心策划、组织编写了《特高压输电线路带电作业培训教材》,共分为《基本知识分册》《标准化作业交流分册》《标准化作业直流分册》《交流标准化作业演示》《直流标准化作业演示》五个分册。

本书为《基本知识分册》,共分五章,主要内容包括概述、特高压输电线路的结构形式及受力分析、特高压输电线路带电作业关键技术、特高压输电线路带电作业常用工器具以及特高压输电线路常规带电作业项目及方法。

本书可作为特高压输电线路带电作业的专项培训教材,还可作为输电线路运行检修、带电作业技术和技能人员的岗位培训教材与工作现场的参考书,也可供大专院校相关专业师生阅读参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

特高压输电线路带电作业培训教材. 基本知识分册/国家电网公司运维检修部组编. —北京: 中国电力出版社, 2016. 4  
ISBN 978-7-5123-9094-2

I. ①特… II. ①国… III. ①特高压输电-输电线路-带电作业-技术培训-教材 IV. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 055440 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>)

三河市万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2016 年 4 月第一版 2016 年 4 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 12.25 印张 284 千字

印数 0001—1500 册 定价 50.00 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

# 《特高压输电线路带电作业培训教材 基本知识分册》

## 编 委 会

主 任 王风雷

副主任 杜贵和 张祥全

主 编 王 剑

副主编 刘 凯 冯 刚

参 编 彭 波 谢 峰 刘 庭 马建国

龚政雄 褚双伟 蔡俊鹏 张 伟

彭 勇 向文祥 雷冬云 陶留海

徐元超 苏庆民 肖 宾 沈晓龙

汪志刚 杨朝锋 贾明亮 王 琳

苏梓铭 何龙飞 张建辉 孟海磊

陈 盟

# 前 言

为大力实施国家电网公司“人才强企”战略，培养高素质技能人才队伍，进一步提高特高压输电线路的运维工作水平，加快打造一支素质过硬、业务精湛的特高压输电线路带电作业队伍，国家电网公司运维检修部统筹一批优秀培训、技术和技能专家，认真总结、提炼公司特高压输电线路带电作业科研、试验和生产宝贵经验，精心策划、组织编写了《特高压输电线路带电作业培训教材》，共分为《基本知识分册》《标准化作业交流分册》《标准化作业直流分册》《交流标准化作业演示》《直流标准化作业演示》五个分册。

本套教材以特高压输电线路带电作业人员能力需求和工作需要，注重实际工作现场与理论知识的结合。在编写原则上，突出完善知识体系、提升应用能力为核心；在内容定位上，遵循“知识够用、为技能服务”的原则，突出针对性和实用性，并涵盖了特高压输电线路带电作业最新的标准、规定以及新设备、新工具和新技术；在内容编排上，深入浅出，避免繁琐的理论推导，重点解释关键参数对于生产现场的现实指导意义。

本书为《基本知识分册》，共分为五章，主要内容包括概述、特高压输电线路的结构形式及受力分析、特高压输电线路带电作业关键技术、特高压输电线路带电作业常用工器具以及特高压输电线路常规带电作业项目及方法。其中，第一章第一节由国网技术学院编写，第一章第二节、第三节和第三章由中国电力科学研究院编写；第二章由国网湖南省电力公司和国网湖北省电力公司编写；第四章由国网河南省电力公司编写；第五章由国网山东电力公司编写。全书由国网技术学院统稿。

由于特高压输电线路带电作业技术尚处在探索阶段，加之编写时间仓促和能力有限，书中难免存在疏漏之处，恳请各位专家和读者提出宝贵意见，帮助我们修改完善。

编 者

2016年1月

# 目 录

## 前言

第一章 概述	1
第一节 特高压输电技术的发展	1
一、电网及其发展	1
二、特高压输电技术的特点及发展	5
第二节 带电作业技术的发展	18
一、带电作业的概念	18
二、国外带电作业的发展概况	19
三、我国带电作业的发展概况	20
第三节 特高压线路带电作业技术的原理及特点	22
一、电对人体的影响	23
二、带电作业方式的划分	26
三、带电作业的工作原理	26
四、特高压输电线路的特点及其对带电作业提出的新要求	30
第二章 特高压输电线路的结构形式及受力分析	31
第一节 特高压输电线路的结构形式	31
一、特高压交流输电线路的结构形式	31
二、特高压直流输电线路的结构形式	39
第二节 特高压交流输电线路带电作业受力分析	48
一、作业方法	48
二、作业条件	48
三、直线塔受力计算分析	49
四、直线塔安全作业距离校核	50
五、耐张绝缘子更换受力计算分析	51
六、导线过牵引计算	51
第三节 特高压直流输电线路带电作业受力分析	52
一、作业方法	52



二、作业条件 .....	52
三、直线塔受力计算分析 .....	53
四、直线塔安全作业距离校核 .....	55
五、耐张绝缘子更换受力计算分析 .....	55
六、导线过牵引计算 .....	56
七、工器具最大破断力与绝缘子吨位及连接方式的关系 .....	56
<b>第三章 特高压输电线路带电作业关键技术 .....</b>	<b>57</b>
<b>第一节 特高压输电线路带电作业关键技术参数 .....</b>	<b>57</b>
一、带电作业关键技术参数确定依据 .....	57
二、关键技术参数获取方法 .....	61
三、1000kV 特高压交流输电线路带电作业关键技术研究 .....	61
四、±800kV 特高压直流输电线路带电作业关键技术研究 .....	69
<b>第二节 特高压输电线路带电作业人员安全防护 .....</b>	<b>77</b>
一、1000kV 特高压交流输电线路带电作业人员安全防护 .....	77
二、±800kV 特高压直流输电线路带电作业人员安全防护 .....	83
<b>第四章 特高压输电线路带电作业常用工器具 .....</b>	<b>93</b>
<b>第一节 特高压输电线路带电作业绝缘工器具 .....</b>	<b>93</b>
一、绝缘材料的特点和性能 .....	93
二、特高压带电作业用绝缘材料 .....	94
三、带电作业绝缘工器具最短有效绝缘长度的确定 .....	95
四、特高压带电作业绝缘工具使用要求 .....	96
<b>第二节 特高压输电线路带电作业金属工器具 .....</b>	<b>100</b>
一、带电作业金属工器具机械荷载的确定 .....	100
二、1000kV 特高压交流输电线路带电作业金属工器具 .....	101
三、±800kV 特高压直流输电线路带电作业金属工器具 .....	107
四、带电作业金属工器具使用注意事项 .....	113
<b>第三节 特高压输电线路带电作业检测工器具 .....</b>	<b>114</b>
一、带电作业检测工器具概述 .....	114
二、带电作业地理气象环境现场检测方法 .....	115
三、带电作业用绝缘工器具的现场检测方法 .....	118
<b>第四节 特高压输电线路带电作业工器具管理 .....</b>	<b>126</b>
一、带电作业工器具的试验 .....	126
二、带电作业工器具的使用、运输与保管 .....	127
<b>第五章 特高压输电线路常规带电作业项目及方法 .....</b>	<b>130</b>
<b>第一节 特高压输电线路带电作业的要求 .....</b>	<b>130</b>
一、一般要求 .....	130
二、技术要求 .....	131





# 第一章

## 概 述

### 第一节 特高压输电技术的发展

#### 一、电网及其发展

##### (一) 电网的基本概念

电力系统是由发电、输电、配电、用电等环节组成的电能生产、传输、分配和消费的系统。电网包括输电、配电和用电环节，用于联系发电厂和电力用户。

电网主要包括输电网和配电网。输电网的功能是将发电厂发出的电力送到消费电能的地区，或进行相邻电网之间的电力互送，形成互联电网。配电网的功能是接受输电网输送的电力，然后进行再分配，输送到城市和农村，进一步分配和供给工业、农业、商业、居民以及有特殊需要的用电部门。

就电力输送和供给方式而言，有交流输配电和直流输电两大类方式。交流输配电方式由升压变电站、降压变电站（包括一次设备和二次设备）及其相连的输电线路完成。输变电设备连接起来构成输电网，配变电设备连接起来构成配电网。直流输电方式由直流输电线路和换流站的各种设备（包括一次设备和二次设备）实现。变电设备有变压器、电抗器、电容器、断路器、接地开关、隔离开关、避雷器、电压互感器、电流互感器、母线等一次设备和继电保护、监视、测控、电力通信系统等二次设备。输电设备主要有导线、杆塔、绝缘子串、地线（含光纤）等。直流设备有换流阀、换流变压器、平波电抗器、直流滤波器、直流隔离开关、接地开关、旁路开关、直流断路器、直流测量装置以及直流避雷器等。

在电力系统中，需要多次采用升压或降压变压器对电压进行变换，也就是说在电力系统中采用了很多不同的电压等级。输电电压一般分为高压、超高压和特高压。国际上对于交流输电网，高压（HV）通常指 35kV 及以上、220kV 及以下的电压等级；超高压（EHV）通常指 330kV 及以上、1000kV 以下的电压等级；特高压（UHV）指 1000kV 及以上电压等级。对于直流输电，超高压通常指  $\pm 500$ （ $\pm 400$ ）、 $\pm 660$ kV 等电压等级；特高压通常指  $\pm 800$ kV 及以上电压等级。

中国已形成了 1000/500/220/110（66）/35/10/0.4kV 和 750/330（220）/110/35/10/0.4kV 两个交流电压等级序列，以及  $\pm 500$ （ $\pm 400$ ）、 $\pm 660$ 、 $\pm 800$ kV 直流输电电压等级。中国的高压电网是指 110kV 和 220kV 电网；超高压电网是指 330、500 和 750kV 电网；特

高压电网是指以 1000kV 交流电网为骨干网架，特高压直流系统直接或分层接入 1000/500kV 的输电网。

电网是电力流通网络，具有物流的基本传输功能。电网将电能从发电侧传输配送到用户侧，这是电网最基本的功能。

### (二) 世界电网的发展

在能源和电力需求增长的驱动下，世界电网经历了从传统电网到现代电网，从孤立城市电网到跨区、跨国大型互联电网的跨越发展，进入以坚强智能电网为标志的新阶段。为适应“两个替代”的新要求，坚强智能电网将向全球广泛互联方向加快发展，构建全球能源互联网，为世界经济社会发展提供更安全、更经济、更清洁、可持续的能源。

自 1875 年在法国巴黎建成世界上第一座火力发电厂开始，至今世界电力工业已发展了 130 多年。进入 21 世纪，建设具有跨国和跨洲电力配置能力、灵活适应新能源发展和多样化需求服务的现代电网体系——坚强智能电网，成为世界电网发展的方向和战略选择。

#### 1. 世界电网的发展规律

(1) 电压等级的提升。在输送同样功率的情况下，提高电网电压，减小线路电流，是实现电力远距离、大容量、低损耗输送的有效途径。一般来说，更高一级电压的引入时间，就是系统尖峰负荷功率增长到 4 倍及以上的时间。从历史看，在经济持续增长阶段，新的更高电压等级的出现时间一般为 15~20 年。1891 年，德国最早开始建设的交流输电线路电压为 13.8kV；至 1900 年，美国已经建成 60kV 高压线路；1952 年，瑞典建成世界上第一条 380kV 超高压线路；至 1969 年，美国投运的超高压线路达到 765kV；2009 年，中国第一条 1000kV 商用特高压交流线路投运。世界交流输电电压等级发展历程如图 1-1 所示。

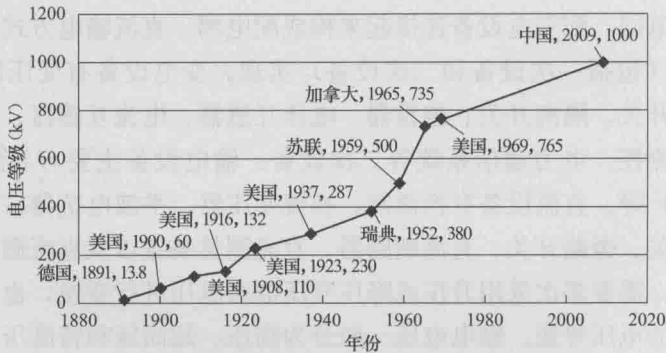


图 1-1 世界交流输电电压等级发展历程

直流输电技术的发展主要经历了汞弧阀换流、晶闸管换流两个阶段，目前正在开发应用基于可关断器件的柔性直流输电。从 1882 年德国最早开始建设的 1.5kV 直流输电线路开始，1954 年瑞典建成±100kV 高压直流输电线路；1962 年苏联建成了±400kV 超高压直流输电线路；1984 年，巴西的伊泰普超高压直流输电工程达到±600kV；2010 年，中国±800kV 特高压直流输电工程投运。世界直流输电电压等级发展历程如图 1-2 所示。

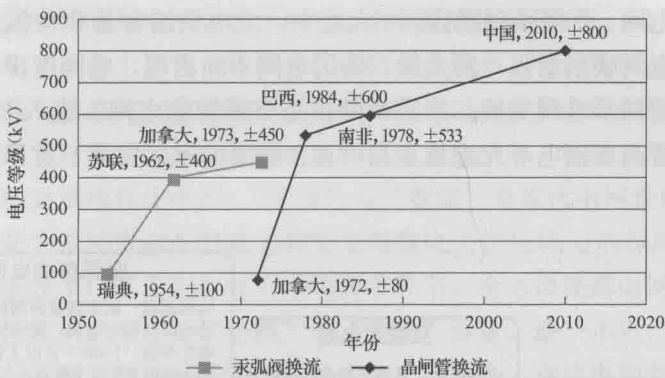


图 1-2 世界直流输电电压等级发展历程

(2) 联网规模扩大。19 世纪末至 20 世纪中期，电网发展以城市电网、孤立电网和小型电网为主，规模很小，仅在局部实现电力平衡。随着接入电网的发电装机容量不断增长，要求电网提高资源配置能力、扩大输电范围。

电网开始向以高电压、强互联为特征的大型互联电网发展，逐步形成以 330、500、750kV 超高压和 1000kV 特高压构建的跨区大电网。500~750kV 超高压输电的传输距离是 700~1000km，而特高压交直流输电可以将传输距离提升到 2000~5000km，覆盖世界主要国家和地区的地域跨度，赋予电网更大范围调配能源资源的能力，为世界电网跨洲大范围互联奠定了基础。目前，全球已经形成了北美互联电网、欧洲统一电网、俄罗斯—波罗的海电网等跨国互联大电网。

(3) 自动化程度增强。在过去的 100 多年里，随着电子信息技术推陈出新，自动化技术更新换代，电网自动化程度呈现出由弱到强的演进过程，电力生产的信息化、自动化、互动化水平不断提高。19 世纪末至 20 世纪中期，电网采用简单保护和经验型调度，系统自动化多限于单项自动装置，且以安全保护和过程自动调节为主，整体自动化程度较低，电网故障经常导致停电，供电可靠性相对较低。20 世纪中期至 20 世纪末，区域联网的形成在系统稳定、经济调度和综合自动化方面提出了新的要求。电网实现了较复杂的保护与调度，各种自动装置得到推广使用，远动通信技术得到广泛采用，数据采集与监控系统（SCADA）开始出现，继电保护装置中逐渐采用微型计算机，电网自动化程度快速提升，供电可靠性也显著提高。20 世纪末至今，随着电网规模和范围的扩大，现代控制、信息通信等先进技术得到越来越广泛的应用，电力系统自动化处理的信息量越来越大，考虑的因素越来越多，直接可观可测的范围越来越广，可实现闭环控制的对象越来越丰富。同时，通过智能电网技术寻求更高的安全性和可靠性成为一种主流趋势。现代电力系统已成为集成计算机、控制、通信、电力装备及电力电子装置的统一体，电网安全稳定水平大幅提升。

## 2. 世界电网的发展方向

世界电网发展总体划分为三个阶段，如图 1-3 所示。第一个阶段是小型电网。19 世纪后期到 20 世纪中期，发电机组容量较小、装机规模较少，电网电压等级低、互联范围小，不同电网之间联系很弱，电网形态主要是以城市或局部区域电力配置为主的小型孤立电网。第

二个阶段是互联大电网。20 世纪中期到 20 世纪末，发电机组容量和装机规模不断提升，电网电压等级提高、电网联系增强，跨大区、跨国电网不断出现，电网逐步向具有全国或跨国电力配置能力的大型同步电网发展。第三个阶段是坚强智能电网。进入 21 世纪，随着信息通信、现代控制、特高压输电等先进技术和可再生能源的迅猛发展，世界电网进入了智能电网发展的新阶段。

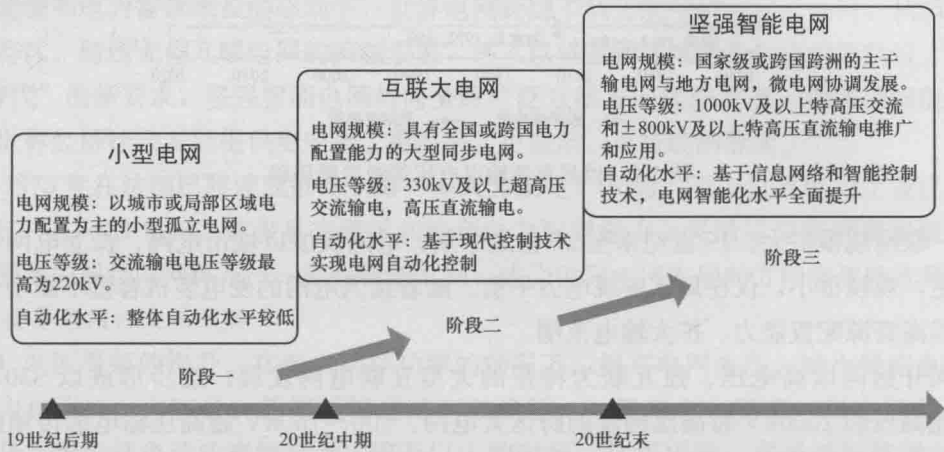


图 1-3 世界电网发展历程

与现有电网相比，未来电网的使命将发生重大变化：

- (1) 大规模新能源电力的输送网络，具有接纳大规模可再生能源电力的能力。
- (2) 灵活、高效的能源配置和供应系统，建立用户需求响应机制，分布式电源和储能将改变终端用电模式，电能将在电网和用户间双向流动，大幅度提高终端能源利用效率。
- (3) 安全、可靠的智能能源网络，具有极高的供电可靠性，基本排除大面积停电的风险。
- (4) 覆盖城乡的能源、电力、信息的物联网和综合服务体系，实现“多网合一”，成为能源、信息的双重载体。

中国风电、太阳能发电等新能源发电发展迅猛，主要集中在华北北部、东北、西北地区，其接入、送出和消纳均存在一些亟待解决的问题。东中部地区持续严重的雾霾是能源发展方式不合理、结构性矛盾长期积累的集中暴露，亟需加快实施电能替代，扩大电能终端能源消费中的比例，全面提高电气化水平。随着特高压输电技术的成熟，亟需加快建设以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展、技术先进、灵活高效的坚强智能电网，建成能源资源优化配置的市场平台，满足经济社会发展和优化配置资源的需要。未来 20 年，中国还将处于快速发展阶段，这个阶段的电网发展将是现有电网的延伸和扩张，电网的资源配置平台作用将大幅提升，从用户角度来看，供电质量及服务水平将会进一步提高。

中国是智能电网发展较早的国家之一，结合能源资源布局特点和经济社会快速发展的需求，在实施“一特四大”战略（即加快特高压电网建设，促进大煤电、大水电、大核电、大型可再生能源基地集约开发）的基础上，提出了坚强智能电网的发展理念。

坚强智能电网是以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展，涵盖电源接入、输电、变电、配电、用电和调度各个环节，集成现代通信信息技术、自动控制技术、决策支持技术与先进电力技术，具有信息化、自动化、互动化特征，适应各类电源和用电设施的灵活接入与退出，实现与用户友好互动，具有智能响应和系统自愈能力，能够显著提高电力系统安全可靠性和运行效率的新型现代化电网。“坚强”与“智能”是现代电网发展的基本要求。“网架坚强”是基础，是大范围资源配置能力和安全可靠电力供应能力的保障；“泛在智能”是关键，是指各项智能技术广泛应用在电力系统各个环节，全方位提高电网的适应性、可控性和安全性。现代电网发展必须坚持“坚强”与“智能”并重，缺一不可。

随着电网技术的不断发展以及与智能化技术的广泛融合，现代电网的形态、功能正在发生深刻变化，电网功能将由单一的电能输送载体，向具有强大能源资源优化配置功能的智能化基础平台升级。随着“两个替代”的加快推进，清洁能源利用规模越来越大，电能在终端能源需求中的比例越来越高，电网配置能源资源的效益更加显著，将进一步促进全球范围内电网向互联互通迈进，逐步实现电网全球互联、清洁能源全球配置，形成全球互联的坚强智能电网。

### 3. 全球能源互联网

全球能源互联网是以特高压电网为骨干网架，以输送清洁能源为主导，全球互联泛在的坚强智能电网。全球能源互联网将由跨国跨洲骨干网架和涵盖各国各电压等级电网的国家泛在智能电网构成，连接“一极一道”和各洲大型能源基地，适应各种分布式电源接入需要，能够将风能、太阳能、海洋能等可再生能源输送到各类用户，是服务范围广、配置能力强、安全可靠、绿色低碳的全球能源配置平台。

全球能源互联网的发展框架可以概括为一个总体布局、两个基本原则、三个发展阶段、四个重要特征、五个主要功能。全球能源互联网将形成由跨洲电网、跨国电网、国家泛在智能电网组成，各层级电网协调发展的总体布局，坚持清洁发展和全球配置两个基本原则，经过洲内互联、跨洲互联、全球互联三个发展阶段，具备网架坚强、广泛互联、高度智能、开放互动四个重要特征，实现能源传输、资源配置、市场交易、产业带动和公共服务五个主要功能。

## 二、特高压输电技术的特点及发展

### (一) 特高压输电技术的特点

#### 1. 特高压输电技术

特高压输电技术包括特高压交流输电技术和特高压直流输电技术，是当前世界电网技术的制高点。特高压输电技术是指交流电压等级为 1000kV 及以上、直流电压等级为  $\pm 800$ kV 及以上的输电技术。

交流输电工程中间可以落点，具有网络功能，可以根据电源分布、负荷布点、输送电力、电力交换等实际需要构成电网。特高压交流输电具有输电容量大、覆盖范围广的特点，为国家级电力市场运行提供平台，能灵活适应电力市场运营的要求；且输电走廊明显减少，线路、变压器有功功率损耗与输送功率的比值较小。

直流输电工程主要以中间不落点的两端工程为主，可点对点、大功率、远距离直接将电



力送往负荷中心。直流输电可以减少或避免大量过网潮流，按照送、受端运行方式变化而改变潮流，潮流方向及大小均能方便地进行控制。研究表明，从经济和环境等角度考虑，特高压直流输电是超远距离、大容量输电的优选方式，但高压直流输电必须依附于坚强的交流电网才能发挥作用。

交流与直流都是电网的组成部分，在电网中的应用各有特点，两者相辅相成；电网的发展不能单纯依靠直流输电，需构建交流、直流相互支撑的坚强电电网。直流输电适用于超过交直流经济等价距离的远距离点对点、大容量输电；“背靠背”直流输电技术主要适用于不同频率的系统间的联网。交流输电主要定位于构建坚强的各级输电网络和电网互联的联络通道，同时在满足交直流输电的经济等价距离条件下，广泛应用于电源的送出。

未来全球能源互联网将以特高压电网为骨干网架，实现全球清洁能源的大规模、大范围配置。

## 2. 特高压输电的优点

与超高压输电相比，特高压输电具有如下优点：

(1) 线路输送容量大。输电线路的功率输送能力与电压的平方成正比，与输电线路的阻抗成反比。对于输电线路的近似功率输送能力，可以估计电压升高一倍，功率输送能力提高四倍。一般情况下，单回 1000kV 特高压输电线路的自然功率接近 5000MW，为 500kV 输电线路的 5 倍左右。 $\pm 800\text{kV}$  直流特高压输电能力可达到 6400MW，是  $\pm 500\text{kV}$  高压直流的 2.1 倍，是  $\pm 620\text{kV}$  高压直流的 1.7 倍。

(2) 电气距离短。1000kV 输电线路的电气距离相当于同长度 500kV 输电线路的  $1/5 \sim 1/4$ 。换句话说，在输送相同功率的情况下，1000kV 输电线路的最远送电距离约为 500kV 输电线路的 4 倍。采用  $\pm 800\text{kV}$  直流输电技术使超远距离的送电成为可能，经济输电距离可以达到 2500km 及以上。

(3) 功率损耗低。特高压输电线路均需采用多根分裂导线，每根分裂导线的截面大都在  $600\text{mm}^2$  以上，这样可以减少电晕放电所引起的损耗以及无线电干扰、电视干扰、可听噪声干扰等不良影响。

输电线路的有功损耗与输送的有功和无功的平方成正比，与电压平方成反比。因此，在输送相同功率的情况下，提高输电线路电压能显著减少线路有功损耗；减少线路的无功传输，可大大减少线路有功和无功损耗，提高线路运行的经济性，减少受端并联无功补偿投资。通常情况下，1000kV 交流线路的电阻损耗仅为 500kV 交流线路的 30%， $\pm 800\text{kV}$  直流线路的电阻损耗是  $\pm 500\text{kV}$  直流线路的 39%，是  $\pm 620\text{kV}$  直流线路的 60%。

(4) 工程投资省。采用特高压输电技术，可以节省大量导线和铁塔材料，从而降低建设成本。根据有关设计部门的计算，1000kV 交流输电方案的单位输送容量综合造价约为 500kV 输电方案的  $3/4$ ， $\pm 800\text{kV}$  直流输电方案的单位输送容量综合造价也约为  $\pm 500\text{kV}$  直流输电方案的  $3/4$ 。

(5) 提高单位走廊输电能力，节省走廊面积。对于 1000kV 特高压交流输电线路，同塔双回和猫头塔单回线路的走廊宽度分别为 75m 和 81m，单位走廊输送能力分别为 133 MW/m 和 62MW/m，约为同类型 500kV 线路的 3 倍。 $\pm 800\text{kV}$ 、6400MW 直流输电方案的线路走廊约为

76m, 单位走廊宽度输送容量为 84MW/m, 是±500kV、3000MW 方案的 1.29 倍, ±620kV、3800MW 方案的 1.37 倍。

(6) 改善电网结构, 降低系统短路电流。通过特高压实现长距离送电, 可以减少在负荷中心地区装设机组的需求, 从而降低短路电流幅值。长距离输入 10000MW 电力, 相当于减少本地装机 17 台 600MW 机组。每台 600MW 机组对其附近区域 500kV 系统的短路电流约增加 1.8kA, 如果这些机组均装设在负荷中心地区, 则对当地电网的短路电流水平有较大的影响。

## (二) 特高压输电技术的发展

### 1. 世界特高压输电技术的发展

20 世纪 60 年代起, 世界主要电力大国开展了一系列的特高压输电关键技术和设备制造研究工作。从 20 世纪 60 年代开始, 苏联、日本、美国、意大利等国家先后提出发展特高压输电技术, 开展了特高压输电规划、设计、试验和设备研制等工作, 取得了一些成果。苏联、日本等国后期由于用电负荷增长缓慢, 对大容量、远距离输电的需求减弱, 从而导致特高压输电工程暂时搁置或延期, 或是降压运行。美国和意大利等国出于技术储备的考虑开展了相关研究工作。印度和巴西根据可再生能源开发输送需求开展了工程建设实践。中国自 1986 年就开展了特高压交流输电的前期论证和可行性研究。2004 年, 组织开展特高压交流输电工程关键技术的研究, 形成技术框架。2006 年, 特高压交流输电技术进入工程应用, 试验示范工程开工建设, 并于 2009 年投运。2004 年, 中国开始对±800kV 特高压直流输电工程技术进行全面深入的研究, 在直流高电压、大电流、大功率输电技术和装备方面实现了全面突破。近年来, 中国特高压输电技术发展很快, 特高压电网将西北部的风电、太阳能发电和西南部的的水电送到东部沿海的用电负荷中心, 输电距离从几百千米提升到几千千米, 单回线路输电容量增加到 8000MW。

世界特高压输电工程发展大事记如表 1-1 所示。

表 1-1 世界特高压输电工程发展大事记

时间	事 件
20 世纪 60 年代	苏联、美国、日本、意大利等国家先后提出发展特高压输电技术, 开展了特高压输电规划、设计、试验和设备研制等工作
1974 年	美国开始建设 1000~1500kV 三相试验线路, 并投入运行
1978 年	苏联开始建设从伊塔特到新库涅茨克 270km 的 1150kV 工业试验线路
1985 年	世界上第一条 1150kV 输电线路——埃基巴斯图兹—科克契塔夫输电线路在额定工作电压下带负荷 (低于 200 万 kW) 运行, 20 世纪 90 年代初以来一直降压到 500kV 运行
1988 年	日本开始建设向东京送电的 1000kV 特高压输电线路, 线路全长 426km, 一直降压到 500kV 运行, 并建成新榛名特高压实证试验场
1995 年	意大利建成萨瓦雷托 1000kV 实验站
2006 年	中国首个 1000kV 特高压交流工程开工
2007 年	中国向家坝—上海±800kV 特高压直流示范工程开工
2009 年	中国晋东南—南阳—荆门 1000kV 特高压交流试验示范工程投入商业运行
2010 年	中国向家坝—上海±800kV 特高压直流示范工程成功投运



时间	事 件
2011 年	印度开工建设比斯瓦纳特恰里亚利—阿格拉±800kV 特高压直流线路, 额定功率 600 万 kW, 线路长度 1728km
2012 年	中国锦屏—苏南±800kV 特高压直流工程投运
2013 年	中国淮南—浙北—上海 1000kV 特高压交流工程投运
2014 年	中国哈密南—郑州、溪洛渡—浙西±800kV 特高压直流工程和浙北—福州 1000kV 特高压交流工程投运; 巴西美丽山±800kV 特高压直流工程开工, 线路长度 2092km

## 2. 特高压输电技术的发展方向和前景

(1) 进一步提升特高压输电容量和距离。在现有特高压技术基础上, 未来将研究发展更高电压、更大容量的交直流输电技术。随着电压控制技术、绝缘与过电压技术、电磁环境和噪声控制技术、外绝缘配合、关键设备制造等技术进一步取得创新突破, 特高压输电距离和输电容量将进一步提升。

(2) 研制高可靠性的换流变压器、换流阀、套管、直流滤波器等关键设备。直流输电技术是实现超远距离、超大容量输电的重要基础, 是连接大型能源基地和用电负荷中心的主要技术形式。近期, 重点突破±1100kV 模块化电压源型换流阀拓扑研究及换流阀技术。预计 2018 年前后, ±1100kV 特高压直流输电技术全面突破并实现工程应用, 输电距离超过 5000km, 输电容量达到 12000MW。

(3) 研制适应极热极寒地区的特高压输电设备。目前, 特高压工程运行环境温度在最低-50℃, 最高 60℃, 而北极最低温度达到-68℃, 赤道的最高地面温度超过 80℃, 均超过现有特高压输电装备承受范围。电工材料在极高温和极低温的条件下绝缘性能会下降, 必须根据极热或极寒地区的特点, 研究适用于该特点下的相关设备的关键技术。到 2030 年前后, 适用于极寒与极热地区的全套特高压直流关键设备将取得突破, 特高压直流紧凑型换流站实现工程应用, 满足“一极一道”等大型清洁能源基地电力送出需求。

目前, 1000kV 特高压的输电成本只有 500kV 超高压输电成本的 72% 左右。随着全球能源互联网的建设, 特高压设备实现规模化生产后, 输电成本将进一步降低。

### (三) 中国特高压输电技术的研究及工程实践

21 世纪以来, 中国经济持续快速发展, 能源需求不断增长, 推动大型煤电、水电、核电和以风电、太阳能发电为主的可再生能源基地加快建设。同时, 中国能源资源和能源消费在地域上呈现逆向分布的特点, 迫切需要大范围、大规模优化配置资源, 发挥坚强智能电网大容量、远距离输电的优势, 实现各类能源基地集约开发和外送消纳。

#### 1. 中国特高压输电技术的研究

自 2004 年中国全面开始发展特高压输电以来, 在技术、装备等方面取得了重要突破, 实现了“中国创造”和“中国引领”。截至 2014 年底, 国家电网公司在特高压输电领域获得专利总计 705 项, 其中发明专利 318 项, 实用新型与外观设计专利 387 项。国际电工委员会前主席克劳斯·乌赫勒表示, 中国的特高压输电技术在世界上处于领先水平, 作为国际标准电压, 中国的特高压交流电压标准将向世界推广。

(1) 特高压交流输电关键技术。系统电压控制、潜供电流抑制、外绝缘配合、电磁环境控制等是关系特高压交流输电发展的核心技术。国家电网公司通过自主创新、联合攻关,取得了全面突破,在这些关键技术领域总体处于世界领先水平。在系统电压控制方面,通过采取过电压幅值控制、保护联动跳闸、高性能避雷器、合闸电阻、地线优化、无功控制等措施,实现了对工频过电压、操作过电压、雷电过电压以及系统运行过电压的控制;在潜供电流抑制方面,通过在特高压电抗器中性点装设小电抗元件,有效抑制潜供电流,提高了线路单相重合成功率,有力保障了系统供电可靠性;在外绝缘配合方面,通过深度抑制操作过电压水平、采用复合绝缘子和套管、模拟高海拔绝缘特性等措施,解决了外绝缘尺度大幅增加、绝缘耐受电压能力随污秽度和海拔增加显著下降等难题,在保障安全的基础上显著提升系统的经济性;在电磁环境控制方面,提出了复杂多导体系统工频电场模型仿真、导线布置优化、金机电晕控制等一系列技术和措施,有效降低了噪声和无线电干扰的影响,实现了环境友好。1000kV 特高压交流输电线路如图 1-4 所示。

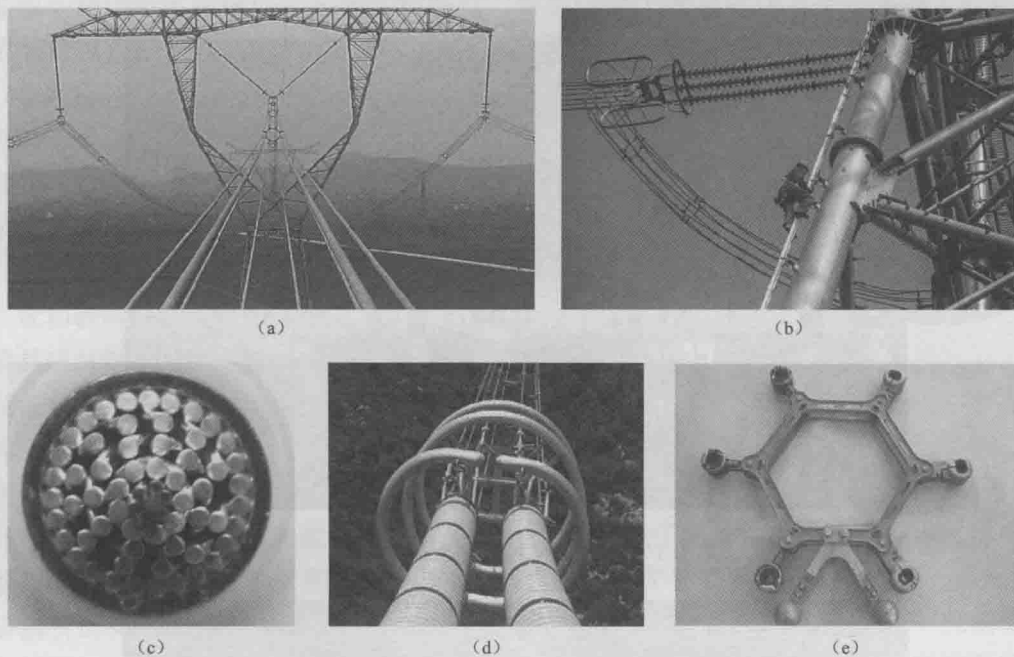


图 1-4 1000kV 特高压交流输电线路

(a) 1000kV 特高压交流输电线路; (b) 1000kV 特高压交流钢管; (c) 疏绕型扩径导线 900/40;  
(d) 导线双联耐张串均压环和屏蔽; (e) 线夹回转式间隔棒双摆防舞者

(2) 特高压交流设备关键技术。发展特高压输电,设备是关键。国家电网公司联合电工装备制造企业,自主研制了世界首台额定电压 1000kV、额定容量 3000MVA 的特高压交流变压器(图 1-5),攻克了变压器的绝缘结构设计、控制漏磁和防止局部过热等关键技术;研制了气体绝缘金属封闭开关设备(GIS/HGIS),攻克了特高压交流断路器操动机构、灭弧室等设计技术(图 1-6);研制了世界最大单相容量的特高压交流并联电抗器(图 1-7),单体容量达到 320MW,解决了高电压、大容量条件下并联电抗器的漏磁和温