

21 世纪电力系统及其自动化规划教材

# 输变电技术

蔡金铤 李天友 邹阳 编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

014042249

TM72  
53

21世纪电力系统及其自动化规划教材

# 输变电技术

蔡金锭 李天友 邹阳 编



机械工业出版社



北航

C1728659

TM72

53

010403010

本书以提高高校电气工程专业学生从业能力为主线,结合电网企业工作岗位设置的特点,对输变电相关技术、运行管理、维护和检修等理论及实践性内容进行了系统阐述。全书共9章,分别介绍了电力系统相关基本概论、输变电系统组成结构和特点、特高压输电和智能电网相关知识、架空输电线路运行检修、电力电缆运行检修与故障测寻、变电站电气设备及接线方式、变电运行管理和检修管理、电力调度及通信技术、接地网故障诊断与定位、带电作业技术等内容。书中内容注重理论联系实际,并附有大量设备结构原理图、接线图及相关参数,融入当今输变电领域的新技术和新发展的成果。

本书为普通高等教育电气工程及其自动化专业的教科书,也可作为电气工程研究生的学习参考,还可作为电力行业、工矿企业等相关工程技术人员学习培训的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

输变电技术/蔡金锭,李天友,邹阳编.—北京:机械工业出版社,2014.5

21世纪电力系统及其自动化规划教材

ISBN 978-7-111-45880-7

I. ①输… II. ①蔡…②李…③邹… III. ①输电技术—高等学校—教材  
②变电所—电工技术—高等学校—教材 IV. ①TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第030259号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:贡克勤 责任编辑:贡克勤

版式设计:常天培 责任校对:张征

封面设计:陈沛 责任印制:乔宇

唐山丰电印务有限公司印刷

2014年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15印张·368千字

标准书号:ISBN 978-7-111-45880-7

定价:32.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版



# 前 言

进入 21 世纪, 智能电网进入人们视野, 被认为是未来电网的发展愿景, 世界范围内对智能电网的研究与应用可谓方兴未艾, 电网技术正在由一个“传统学科”, 发展成为引起社会高度关注并重点投入研发的“前沿领域”。同时, 随着我国电力市场化的不断推进, 电力行业为适应新形势不断进行管理体制机制的变革。本书内容除了介绍输变电运行检修与管理相关技术外, 还介绍智能电网的发展动向、电网企业的组织架构等内容, 目的是为读者构筑了一个从理论到实践的衔接平台, 提高高校电气工程专业学生从业能力, 完善学生的专业知识结构, 帮助树立工程实践意识, 为今后从事电力行业工作奠定基础。本书主要面向高校电气工程专业或电力系统及其自动化专业本科生, 也可供电气工程研究生和电力行业工程技术人员学习和参考。

本书第二章至第四章由邹阳编写, 其余章节由蔡金锭和李天友编写。全书由邹阳统稿、李天友审核。在本书编写过程中, 福州大学电力系教师张宁、电力系统及其自动化专业研究生张先泰、陈祥伟、彭积城、李安娜、陈嘉鹏、陈斯丹、郑君亮、陈杨、洪艳君、陈晔、程岳雷、邱河炳、曾静岚和郑敏杨等为文字校编等工作付出了辛勤劳动, 在此深表谢意。

限于编者水平, 书中难免存在缺点和错误, 恳请读者批评指正。

作 者



# 21 世纪电力系统及其自动化规划教材

## 编 委 会

主任委员：熊信银

副主任委员：尹项根 韩学山 李庚银 刘宪林

李 扬 陈少华 贡克勤 杨德先 (兼秘书)

委 员：(以姓氏笔画排序)

尹项根 毛承雄 车仁飞 文明浩 文劲宇

叶俊杰 刘学东 刘宪林 孙丰奇 许 珉

李 扬 李庚银 吴耀武 陆继明 张 利

张 波 杨国旺 杨宛辉 杨淑英 杨德先

陈 卫 陈少华 罗 毅 房俊龙 易长松

赵书强 赵玉林 赵丽平 娄素华 栗 然

盛四清 常鲜戎 梁振光 韩学山 游志成

熊信银 魏 萍 蔡金锭

书 封

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第111498号

机械工业出版社 (北京) 邮政编码: 100070

地址: 北京市西城区百万庄大街24号

发行部: (010) 88379649

编辑部: (010) 88379649

唐山中印数码印刷有限公司

2014年5月第1版第1次印刷

184mm × 260mm · 15印张 · 300千字

标准书号: ISBN 978-7-111-49885-7

定价: 32.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

# 目 录

## 前 言

第一章 概 论 .....	1	第三节 定期检修 .....	148
第一节 电力系统概述 .....	1	第四节 状态检修 .....	152
第二节 输变电系统 .....	3	第七章 电力调度及通信技术 .....	164
第三节 特高压输电与智能电网 .....	5	第一节 电力调度系统的分级管理 .....	164
第二章 架空输电线路的运行和检修 .....	9	第二节 电力调度 SCADA 系统 .....	167
第一节 架空输电线路的构成 .....	9	第三节 电力通信技术 .....	172
第二节 特高压交直流输电线路简介 .....	26	第四节 电能质量管理 .....	181
第三节 输电线路的运行 .....	33	第八章 接地网故障的诊断与定位 .....	191
第四节 输电线路的检修 .....	47	第一节 接地网故障的原因及其危害性 .....	191
第五节 电力线路的直升机作业 .....	53	第二节 接地电阻常用的计算方法 .....	192
第三章 电力电缆的运行和检修 .....	59	第三节 降低接地电阻的方法和措施 .....	198
第一节 电力电缆的构成 .....	59	第四节 接地网故障诊断字典法 .....	201
第二节 电力电缆的敷设方式 .....	66	第五节 接地网故障分块诊断法 .....	208
第三节 电力电缆的运行维护 .....	70	第九章 带电作业技术 .....	214
第四节 电力电缆的故障测寻与检修 .....	74	第一节 带电作业的基础知识和	
第四章 变电设备及其接线方式 .....	85	基本方法 .....	214
第一节 变电站的接线方式及平面布置 .....	85	第二节 带电作业工器具 .....	216
第二节 电气主设备的原理及运行特点 .....	96	第三节 带电作业过程 .....	218
第五章 变电运行管理 .....	118	附录 .....	227
第一节 变电站的运行模式 .....	118	附录 A 线路导线的对地距离及	
第二节 变电站的日常运行管理及倒闸		交叉跨越 .....	227
操作管理 .....	124	附录 B 线路环境的污区分级 .....	230
第三节 变电站的设备缺陷管理 .....	132	附录 C 各电压等级线路的最小	
第六章 变电检修管理 .....	136	空气间隙 .....	231
第一节 检修策略与检修组织 .....	136	参考文献 .....	232
第二节 变电设备的预防性试验 .....	140		

二次设备是指对一次设备进行监视、保护、测量、操作控制的辅助设备，如继电保护装置、自动装置、继电保护装置、远动装置、通信系统设备、仪表及信号装置、测量系统设备等。作为一次设备，由一次设备连接而成的系统称为二次系统或辅助系统。

由不同电压等级的变电站和电力线路连接成的汇集、输送、变换和分配电能的网络，即电力系统中不包括发电厂与用电设备的部分，称为电力网（简称电网）。电网又可分为输电网与配电网两部分。

输电网的作用是将远离负荷中心的大型发电厂发出的电能升压，通过输电线路送到负荷中心的枢纽变电站。输电线路距离都比较长，数十、数百千米，有的甚至达数千千米。一般采用超高压输电网输电以提高电力输送容量及其稳定性，并减少输送过程中的损耗。电力系

# 第一章 概 论

## 第一节 电力系统概述

### 一、电力系统的基本概念

为了将发电厂所生产的电能经济有效地传输至电力负荷中心，常常采用高电压线路输送，将发电厂所生产的电能经过升压变压器升压，经过高压传输线路输送并在用户端经降压变压器逐级降压，分配给广大用户。这种由发电厂的发电机、升压变电站、输电线路、降压变电站、配电线路、用电设备及相应的保护、测量控制设备等构成的整体叫做电力系统；若将发电厂的锅炉、水库、核反应堆及汽轮机、水轮机等动力部分也包括在内，则称为动力系统。电力系统构成示意图如图 1-1 所示。

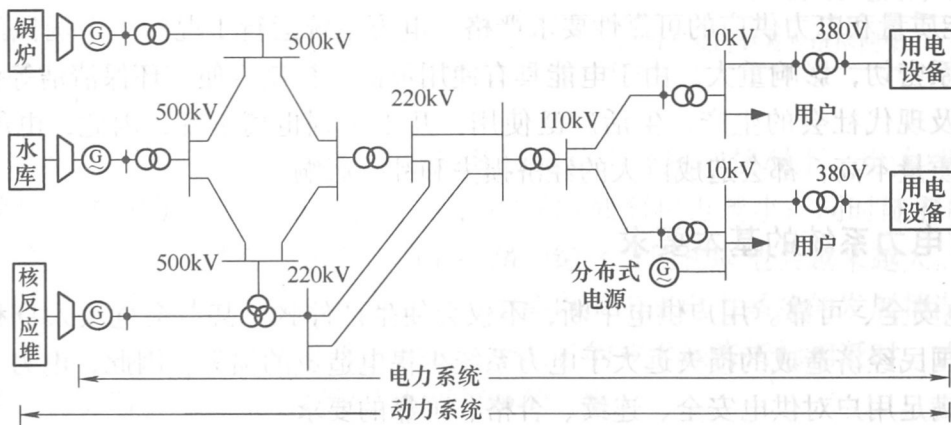


图 1-1 电力系统构成示意图

通常，一次设备包括电能的发、输、变、配、用 5 个环节的电气设备，如发电机、变压器、输配电线路、无功补偿装置、断路器等。一次设备可经受高电压、强电流，所有一次设备连接成的系统称为一次系统。对一次设备进行监视、保护、测量、操作控制的辅助设备，如控制电缆、自动装置、继电保护装置、远程监控装置、通信系统设备、仪表及信号装置、信息系统设备等，称为二次设备。由二次设备连接而成的系统称为二次系统或辅助系统。

由不同电压等级的变电站和电力线路连接成的汇集、输送、变换和分配电能的网络，即电力系统中不包括发电厂与用电设备的部分，称为电力网（简称电网）。电网又可分为输电网与配电网两部分。

输电网的作用是将远离负荷中心的大型发电厂发出的电能升压，通过输电线路送到负荷中心的枢纽变电站。输电线路距离都比较大，数十、数百千米，有的甚至达数千千米。一般采用超高压输电网送电以提高电力输送容量及其稳定性，并减少输送过程中的损耗。电力系



统通常采用多回超高压骨干线路、经由不同路径，构成输电网架。我国输电网有 220kV、330kV、500kV 及以上电压等级。2005 年，我国第一条 750kV 输电线路已在西北电网投运，2009 年，我国第一条 1000kV 特高压交流试验示范工程已正式投产，目前， $\pm 800\text{kV}$  大容量直流输电工程也已建设完成，今后，将逐步形成全国联合电力系统。

配电网的作用是连接、并从输电网受端网架受电，向一地区内供给和配送电能。在我国，配电网通常包括 110kV 及以下电压变电站、配电线路等。

## 二、电力系统运行的特点

电力系统承担着电能的生产、输送、分配和使用任务，与其他行业生产过程相比，其有以下明显特点：

1) 电能不能大量储存。由于目前的技术还不能使电能大量地储存，因此电能的生产、输送、分配和使用是在同一时刻完成的。也就是说，发电厂所发电能在任何时刻都等于同一时刻用户及传输过程中所消耗电能之和，一个电力系统中，发、用功率每时每刻都是平衡的，发、输、配、用各个环节是一个不可分割的整体。

2) 暂态过程非常迅速。电力系统中电压、电流的变化均以电磁波的形式传播，其传播速度为  $300\text{km/ms}$ 。发电机、变压器、线路、用电设备的投入或退出运行所引起的电压、电流的变化都在一瞬间完成，故障的发生和发展过程都十分短暂。

3) 电能质量和电力供应的可靠性要求严格。电力系统运行工况和整个国民经济及社会生活秩序关系密切，影响重大。由于电能具有使用灵活、控制方便、环保清洁等优点，国民经济各环节及现代社会的生产、生活广泛使用，几乎一刻也离不开，因此，电能的供应不足、中断或质量不高，都会造成巨大的经济损失和社会影响。

## 三、对电力系统的基本要求

1) 供电安全、可靠。用户供电中断，不仅会使生产停顿，甚至会危及人身和设备的安全，停电给国民经济造成的损失远大于电力系统少售电造成的损失，因此，电力系统运行的首要任务是满足用户对供电安全、连续、合格、可靠的要求。

2) 供电质量合格。供电电压、频率和波形符合国家规定，为用户提供满意的服务。

3) 降低运行成本。电能生产的规模很大，消耗大量一次能源，在电能生产与输送、分配过程中应力求节约、减小消耗、降低设备维修成本，最大限度地降低供电成本。

4) 降低对环境的负面影响。在电能生产、输送、分配、消费过程中，总是会伴生大量的排放物，如废气、废水、废渣及噪声、电磁污染等，因此，电力企业应遵照环保要求对“三废”进行无害化处理，抑制噪声和电磁污染，最大限度地降低对环境的负面影响。同时，电力设施的建设要减少对土地的占用，且要尽量与周围环境相协调。

## 四、电力系统的额定电压

电力系统的电压等级均由国家规定，称为系统额定电压。额定电压是指能使电气设备长期运行的最经济的电压，通常以电压正弦波的有效值为标志。为了能在经济上合理地匹配使用，电力系统中的发电机、电力线路、变压器等设备都是按与运行工况条件相对应的设备额定电压或规定的系统额定电压校准设计、制造的。由于发展历史等原因，世界各国采用的电

压等级标准不尽相同。在我国，不同区域电网的额定电压系列不同，主要有 500kV/220kV/66kV/10kV、330kV/110kV/35kV/10kV、500kV/220kV/110kV/35kV/10kV 等。我国目前通用的额定电压等级及应用场合见表 1-1。

表 1-1 额定电压等级及应用场合

额定（线）电压/kV	应用场合	应用举例
0.38/0.22	低压配电网	为电力电子用电设备、中小容量动力设备、照明及家电等供电
3	工业企业内部使用	为低压用电设备及大、中容量动力设备供电
6	发电机、工矿企业中压配电网	为低压配电网及大容量动力设备供电
10（20）	发电机、中压配电网	为低压配电网及大容量动力设备供电
35	高压配电网	部分城市及县配电网采用
66	高压配电网	我国东北地区电网采用
110	高压配电网	普遍被城市（或分区）配电网采用
220	高压输电网	作为省或城市供电网网架（网络）
330	超高压输电网	作为西北跨省及省内（或大城市）供电网网架
500	超高压输电网	作为全国跨省、区及省电网网架
750	超高压输电网	作为西北跨省及省电网网架

注：表中内容摘自参考文献[1]。

电力系统电压等级的选择：在输电距离和输送功率一定的情况下，电力线路的电压越高，电流越小，线路的电能损耗就越小，所需的导线截面积也越小；同时随着电压的升高，对导线的绝缘要求也越来越高，花费在输电线路的绝缘费用相应地会越来越大。因此，在选择电力系统的电压等级时，应根据输送容量、距离以及未来电力系统的发展情况而定。这就需要有关的技术部门进行技术和经济的比较，当两者的技术经济指标相近时，或者较低电压方案没有明显优势时，应尽量采用较高电压等级的方案。

## 第二节 输变电系统

输变电系统是指电力网中电压等级为 220kV 及以上的输电和变电设备，通过输电线路有机连接起来的系统。

### 一、输变电系统的构成

输变电系统的构成示意图如图 1-2 所示。变电系统（各个变电站）接纳发电系统（各个发电厂）的电能后，通过较高电压等级（220 kV、330 kV、500 kV、750kV、1000 kV 及以上）的输电系统（输电线路）连接在一起，并将电能输送到配电系统供用户使用。输电线路分为电缆线路和架空输电线路。由于一般输电距离较长，运行环境恶劣，以及考虑到绝缘耐压等原因，我国的输电线路主要以架空线路为主。电缆线路一般用于输电距离短、跨海输电以及美化市容等场合。由于输电系统中每条输电线路上需要输送功率的大小以及传输距

离有所不同,基于技术经济方面的考虑,在同一输电网中可能同时需要采用几种不同等级的电压,因此,需要通过各个变电站将不同电压等级的输电线路连接在一起。变电系统中的变电站主要由变电设备组成,包括变压器、断路器、互感器和避雷器等。

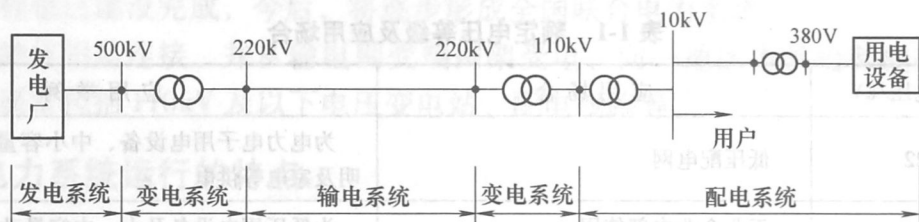


图 1-2 输变电系统构成示意图

## 二、输变电系统的特点

输变电系统的特点及解决方案见表 1-2。

表 1-2 输变电系统的特点及解决方案

特 点	解 决 方 案
输电容量大	提高电压等级,采用超高压、特高压输电
输电距离长	从技术上加强系统的电气联系,缩短电气距离
电压等级高	提高设备绝缘水平
事故影响范围广	提高系统安全性,并提高监控水平
运行环境恶劣	提高输电线路的机械、电气性能
接线方式相对简单	

## 三、输变电系统的运行管理

提高输变电系统的运行管理水平,以及输变电系统运行的安全可靠、技术经济效益是输电和变电部门工作的重点。输变电系统的运行管理包括输电运行管理和变电运行管理两部分。

基于架空输电线路与电缆线路的机械、电气特性等方面的不同,二者的运行管理的内容也有所不同。架空输电线路的运行管理主要包括日常巡视、运行维护以及检修管理。而电缆线路的运行管理除了以上所述的工作与架空线路有所区别外,还包括电缆的防火、故障测寻与检修等内容。

变电站的运行模式包括有人值守模式、无人值守模式和集中监控模式三种,而不同的运行模式具有不同的运行管理标准。变电站日常工作主要包括值班和交接班管理、倒闸操作管理,而变电设备管理包括设备的缺陷管理等;变电检修管理包括检修方式和检修组织管理等方面的内容,其中的状态检修对提高变电运行的可靠性、资产利用效率具有重要的意义。

本书将对以上所述的输电和变电运行管理的内容进行详细的介绍,此外,还将对变电设备及接线方式、电力调度及通信方式等方面的内容进行阐述。



### 第三节 特高压输电与智能电网

#### 一、国内外特高压输电的发展历程与现状

在美国、日本、前苏联和意大利，都曾经建设过特高压交流输电试验线路，并进行了大量的试验和研究，但最终只有日本和前苏联将特高压交流输电线路建成并投入使用。前苏联经过不断地研究，在 1981 年就开始动工建设 1150 kV 特高压交流输电线路，其中包括科克契塔夫—库斯坦奈的 396 km 线路以及埃基巴斯图兹—科克契塔夫的 494 km 线路。埃基巴斯图兹—科克契塔夫线路作为世界上第一条 1150 kV 线路于 1985 年 8 月在额定工作电压下带负荷运行，最后延至库斯坦奈。而后从 1981 年到 1989 年，前苏联还陆续建成特高压线路 1500 km，总体规模达到 2400 km，但由于技术等问题，目前全部降压至 500 kV 运行。日本也已建成额定电压为 1100kV（最高运行电压为 1100kV）的同杆双回输电线路 426km。前苏联在输变电设备制造技术上已基本成熟，但是相比于日本其技术水平还相对落后，日本经历了长达 5 年的带电试验考核，其设备制造技术已经达到国际领先水平，目前正处于分别载流和加压试验阶段，但输电线路一直降压运行<sup>[2]</sup>。我国在特高压领域的研究工作起步较晚，但已经开展一定科研及设备研制的基础工作。晋东南—南阳—荆门特高压试验示范工程是中国自主研发、设计和建设的百万伏交流输变电项目，已于 2009 年初正式建成并投运。这是迄今为止世界上运行电压最高、输送能力最大、技术水平最先进的特高压交流输变电工程，系统最高运行电压达到 1100kV，线路全长 640km，变电容量为  $2 \times 300$  万 kVA，连接华北、华中电网，横贯山西、河南、湖北三省<sup>[3]</sup>。可以预期，我国的特高压交流输电在今后将得到进一步的发展。图 1-3 所示为我国晋东南—南阳—荆门特高压试验示范工程部分现场概况。

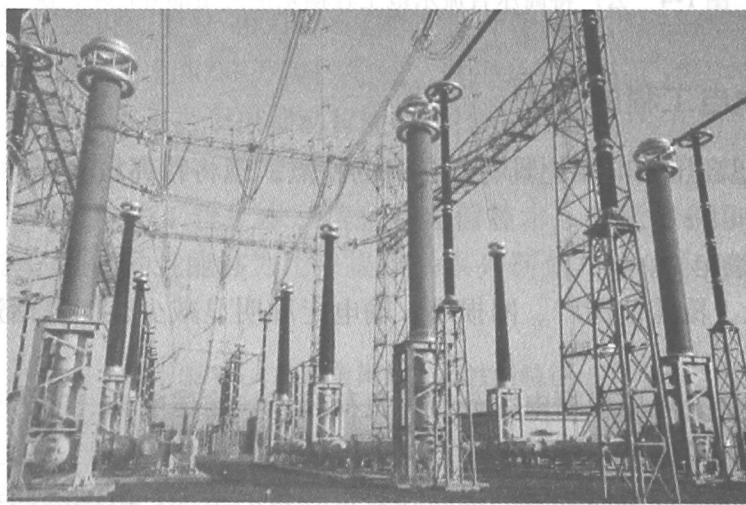


图 1-3 晋东南—南阳—荆门交流特高压试验示范工程部分现场概况

世界上对特高压直流输电技术于 20 世纪 70 年代开始研究，当时印度和非洲的远距离大容量的送电、巴西亚马逊河水电群向东南部和东北部的送电、前苏联哈萨克斯坦的埃基巴斯图兹火电基地向其欧洲部分负荷中心的送电，都曾经对特高压直流输电的应用进行过研究，但最终由于各方面的原因都没有实际建成和投入使用。目前，世界上特高压直流输电已经运

行的最高电压等级为 $\pm 800\text{kV}$ 。近年来,我国在特高压直流输电的技术研究方面也开展地如火如荼,从2003年8月开始,南方电网公司就开始对 $\pm 800\text{kV}$ 的特高压直流输电技术进行了应用研究,并在关键技术领域取得了重大突破。2009年,南方电网“十一五”西电东送重点工程——云南至广东特高压直流示范工程进入了调试起动阶段,这也是世界首个 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电工程,于2010年6月全面建成并投入运行。该工程线路全长1373km,额定输送容量为500万kW。目前,除金沙江直流输电工程和云南小湾的7条特高压直流输电工程外,金沙江流域雅砻江上的锦屏水电站配套建设的特高压直流输电工程,已于2012年全面建成投产,向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电工程已于2010年7月全面建成并投入运行,锦屏—苏南 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电工程已于2012年12月全面建成投运。在未来的15年间,我国的特高压直流输电线路估计将达到10~15条。图1-4所示为我国云广特高压直流示范工程穗东换流站的部分现场概况。

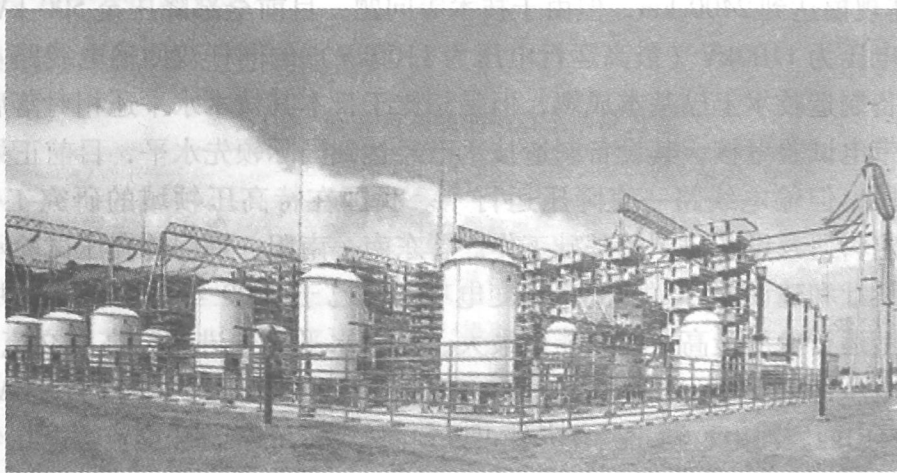


图1-4 云广特高压直流示范工程穗东换流站部分现场概况

## 二、特高压输电工程的特点

特高压输电与超高压输电相比具有其自身的特点,现将特高压交流输电与特高压直流输电的主要特点阐述如下:

### 1. 特高压交流输电

1) 输电能力大、覆盖范围广、网损小、输电走廊明显减少,能灵活适合电力市场运营的要求。

2) 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国家特高压骨干网架。

3) 随着电力系统互联电压等级的提高和装机容量的增加,电网的同步功率系数和功角稳定性也将提到提高。

4) 充电无功功率较大,为了抑制工频过电压,线路必须装设并联电抗器。

5) 1000kV特高压输电的适时引入,可以为直流多馈入受端电网提供坚强的电压和无功支撑<sup>[4]</sup>。

### 2. 特高压直流输电

1) 电压高、输送容量大、线路走廊窄、适合大功率、远距离输电。

2) 可点对点、大功率、远距离直接将电力送往负荷中心。在送受关系明确的情况下,采用特高压直流输电,实现交直流并联输电或非同步联网,电网结构比较松散、清晰。

3) 可以减少或避免大量过网潮流,可按照送受两端运行方式变化而改变潮流,特高压直流输电系统的潮流方向和大小均能方便地进行控制。

4) 在交、直流并联输电的情况下,利用直流有功功率调制,可以有效抑制与其并列的交流线路的功率振荡,包括区域性低频振荡,明显提高交流的暂态、动态稳定性能。

5) 大功率直流输电,当发生直流系统闭锁时,两端交流系统将承受大的功率冲击<sup>[5]</sup>。

### 三、智能电网

随着社会的不断发展,全球对于环境资源等的压力随着增大,用户对电能可靠性及电能质量的要求以及社会对环境保护、可持续发展等的要求不断提高,必然要求电网在未来的发展中能够提供更加安全、可靠、优质、清洁的电力供应。为此,一些国家及组织,特别是以美国和欧盟为代表的国家和组织相继提出了要建设安全、经济、灵活、清洁、友好的智能电网。20世纪60年代计算机在电力系统的应用可以看做是智能电网技术发展的起始阶段。智能电网技术的范畴很广,包括诞生于20世纪80年代的柔性交流输电(FACTS)与90年代的广域相量测量(WAMS)技术。“智能电网”(Smart Grid)的概念最早出自美国“未来能源联盟智能电网工作组”在2003年6月份发表的报告。2003年7月,美国能源部发表“Grid2030”报告,提出了美国电网发展的远景设想,之后美国能源部先后资助了GridWise、Grid-Works、MGI(现代电网)等智能电网研究计划。在实际应用方面,德克萨斯州的CenterPoint能源公司、圣迭戈水电公司(SDG&E)等都在着手智能电网项目的实施或制定发展规划;作为美国盖尔文电力行动计划(GEI)的一部分,伊利诺斯工学院(IIT)正在实施“理想电力(Perfect Power)”项目<sup>[6]</sup>。2009年1月,美国总统奥巴马能源新政开始实施,在白宫发布的《复苏计划尺度报告》中明确指出将铺设或更新3000mile(非法定计量单位,1mile=1609.344m)输电线路,并且将智能电表普及安装至4000万美国家庭,这一举动迎来了美国智能电网整体革命的热潮。此外,欧洲国家和日本也在积极推动智能电网技术的研发与应用工作。

目前“智能电网”并没有统一的定义,但基本含义得到了较为广泛的认可,即智能电网是“集成了传统和现代电力工程技术、信息与通信技术、高级传感和监测技术的输配电系统,具有更加完善的性能并且能够为用户提供一系列新型与增值服务的新型电网。”智能电网的主要性能特征见表1-3。

表 1-3 智能电网的主要性能特征

序 号	特 征	含 义
1	自 愈	自愈是实现电网安全可靠运行的主要功能,指无需或仅需少量人为干预,实现电力网络中存在问题元器件的隔离或使其恢复正常运行,最小化或避免用户的供电中断。通过进行连续的评估自测,智能电网可以检测、分析、响应、甚至恢复电力元器件
2	安 全	无论是物理系统还是计算机遭到外部攻击,智能电网均能有效抵御由此构成的对电力系统本身的攻击伤害以及对其他领域形成的伤害;一旦发生中断,也能很快恢复运行
3	兼 容	通过在电源互联领域引入类似于计算机中“即插即用”技术(尤其是分布式发电资源),可以容纳包含集中式发电在内的多种不同类型发电,甚至是储能装置



(续)

序号	特征	含义
4	交互	电网运行中与用户设备和行为进行交互, 将其视为电力系统的完整组成部分。这将可以促使电力用户发挥积极作用, 实现电力运行和环境保护等多方面的收益
5	协调	与批发电力市场甚至零售电力市场实现无缝衔接, 有效的市场设计可以提高电力系统的规划、运行和可靠性管理水平, 而电力系统管理能力的提升促进电力市场竞争效率的提高
6	高效	引入最先进的 IT 和监控技术优化设备和资源的使用效益, 可以提高单个资产的利用效率, 从整体上实现网络运行和扩容的优化, 降低它的运行维护成本和投资
7	优质	在数字化、高科技占主导的经济模式下, 电力用户的电能质量能够得到有效保障, 实现电能质量的差别定价
8	集成	实现包括监视、控制、保护、能量管理 (EMS)、配电管理 (DMS)、市场运营 (MOS)、ERP 等和其他各类信息系统之间的综合集成, 并实现在此基础上的业务集成

注: 表中内容摘自参考文献[7]。

由以上所述可见, 基于实现对电网运行的快速响应, 提高与分布式清洁能源的兼容能力, 从而提高整个系统的经济性、可靠性和安全性的智能电网势必代表了未来电网的发展方向。我国在智能电网研究方面起步相对较晚, 但是在智能电网的技术研发及应用方面可以说基本达到了世界先进水平。在智能电网方面我国正在不断发展, 地区级以上的电网已实现了调度自动化, 35kV 以上的变电站已基本实现综合自动化, 并且已有 200 多个地级市实现了配网自动化。柔性交流输电 (FACTS) 及广域相量测量系统 (WMAS) 等技术的研发与应用也都有突破性进展<sup>[6]</sup>。根据国家电网公司有关计划, 我国将“坚强智能电网”建设分为三个阶段: 2009 年至 2010 年为规划试点阶段, 重点开展“坚强智能电网”发展规划工作, 制定技术和管理标准, 开展关键技术研发和设备研制及各环节试点工作; 2011 年至 2015 年为全面建设阶段, 加快特高压电网和城乡配电网建设, 初步形成智能电网运行控制和互动服务体系, 关键技术和装备实现重大突破和广泛应用; 2016 年至 2020 年为引领提升阶段, 全面建成统一的“坚强智能电网”, 技术和装备全面达到国际先进水平。

## 第二章 架空输电线路的运行和检修

### 第一节 架空输电线路的构成

#### 一、架空线路的构成

架空线路主要由导线、避雷线、杆塔、绝缘子和金具等构成，如图 2-1 所示。其作用如下<sup>[8]</sup>：

- 1) 导线：传导电流，输送电能。
- 2) 避雷线（又称架空地线）：减少导线受雷电直击的概率，同时将雷电流引入大地以保护电力线路及相关电气设备免受雷击破坏。
- 3) 杆塔：支持导线和避雷线，并使带电导线间、带电导线与避雷线间以及带电导线对地保持相应的安全净距。
- 4) 绝缘子：悬挂或支持导线，使导线和杆塔间保持绝缘。
- 5) 金具：用以支持、连接、固定和保护架空线路中各元件的金属器件的统称。

#### 二、架空导线

架空导线常年工作在空气中，除了要承受自重、风力、冰雪荷载等机械力的作用外，环境温度变化的影响和空气中有害气体的侵蚀，也使其运行条件相当恶劣。所以，要求导线不仅应有良好的导电性能，而且应有相当高的机械强度和抗化学腐蚀能力。

如何解决上述问题？下面从导线的材料和结构进行分析。

##### 1. 架空导线的材料

架空导线主要由铝、铝合金、钢、铜等材料制成。导线材料性能见表 2-1。由表可知：

- 1) 铜导电性能最好，机械强度高，抗腐蚀能力强，是理想的导线材料；但价格高，储量少，架空线很少使用。
- 2) 铝导电性仅次于铜，质轻价廉，但机械强度较低，且抗腐蚀能力也较差。
- 3) 铝合金质量较轻，机械强度接近铜，抗腐蚀能力较好，但电导率低，易受振动影响。

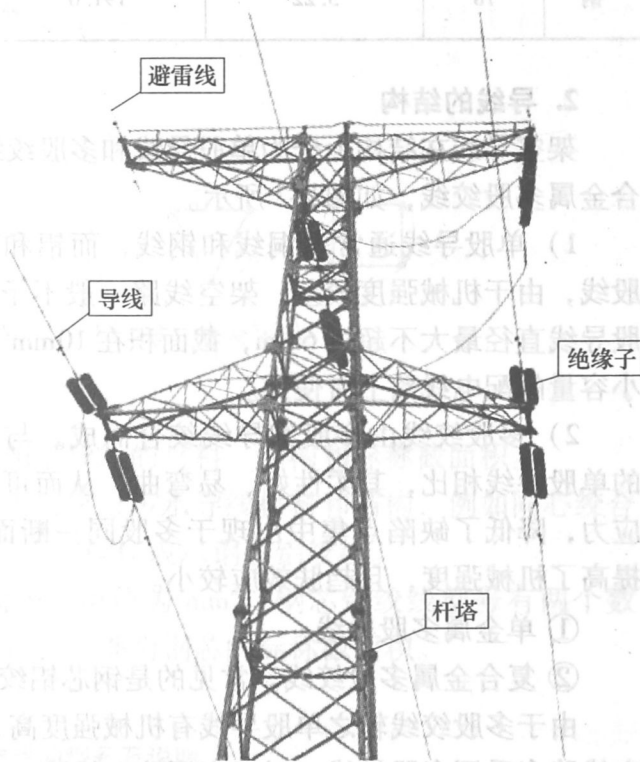


图 2-1 架空线路示意图

4) 钢导电性能最差, 抗腐蚀能力低, 但机械强度很高。

表 2-1 导线材料性能

导线材料	密度/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	电导率 (20℃) / ( $\text{MS}/\text{m}$ )	电阻率 (20℃) / ( $\Omega \cdot \text{mm}$ )	抗拉强度/ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	弹性模量/ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	抗腐蚀性能
铜	89.4	56.26	17.77	390	128000	抗氧化、抗腐蚀能力强
铝	27	35.38	28.264	160~190	61800	抗腐性能较差, 易受酸、碱、盐腐蚀
铝合金	27	30.624	32.8	294	63700	抗腐性能较好, 但易受振动损坏
钢	78	5.22	191.6	1200~1600	196000	抗氧化、抗腐蚀能力低

## 2. 导线的结构

架空导线在结构上分为单股导线和多股绞线两种, 多股绞线又分为单金属多股导线和复合金属多股绞线, 如图 2-2 所示。

1) 单股导线通常是铜线和钢线, 而铝和铝合金单股线, 由于机械强度较差, 架空线路一般不予使用。单股导线直径最大不超过 6mm, 截面积在  $10\text{mm}^2$  以下, 在小容量的配电线路上有使用。

2) 多股绞线由多股细导线绞合而成。与同截面积的单股导线相比, 其柔性好、易弯曲, 从而可减轻弯曲应力, 降低了缺陷点集中出现于多股同一断面的概率, 提高了机械强度, 且趋肤效应较小。

① 单金属多股导线;

② 复合金属多股绞线。常见的是钢芯铝绞线, 35kV 及以上的输电线路多采用。

由于多股绞线较之单股导线有机械强度高、柔韧性好、耐振能力强等优势, 所以目前架空线路多采用多股绞线。对于高压输电线路, 由于输送功率较大, 导线截面积大, 对导线的机械强度要求就高, 而多股单金属导线因各自材料的缺陷, 不能满足较高要求, 所以将铝和钢相结合制成钢芯铝绞线。

此导线将铝线绕在钢线外层, 其芯线为单股或多股镀锌钢绞线, 外层为单层或多层铝绞线, 截面如图 2-2c 所示。

钢芯铝绞线将铝线绕在单股或多股钢线外层, 由于交流电的趋肤效应, 铝线作为主要载流部分, 发挥了铝导电性能较好的特点; 机械荷载部分则由钢线和铝线共同承担, 利用了钢较高的机械强度。因此该导线具有较好的机械特性和电导率, 在较多方面性能甚至超过铜线, 目前在架空线路上广泛使用。

钢芯铝绞线按铝、钢截面比的不同, 可分为普通型钢芯铝线 (JL/G1A 或 JL/G1B)、高强度钢芯铝线 (JL/G2A 或 JL/G2B) 和特高强度钢芯铝绞线 (JL/G3A) 三种形式。一般地区的架空送电线路常采用普通型和高强度钢芯铝线; 重冰区及大跨越档距宜采用特高强度钢

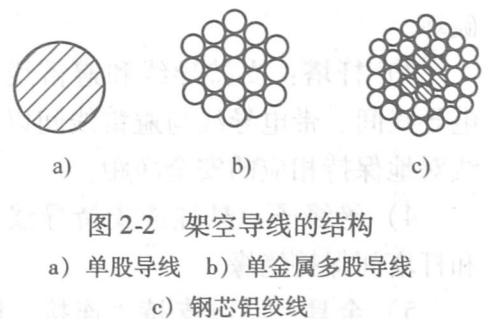


图 2-2 架空导线的结构

a) 单股导线 b) 单金属多股导线  
c) 钢芯铝绞线

芯铝绞线。

对于输变电系统,当线路电压超过 220kV 时,为减小电晕损耗和线路电抗,常需采用直径很大的导线,但就载流容量而言,却又不必采用如此大的截面积。较理想的方案是采用扩径导线或分裂导线。

扩径导线是人为地扩大导线直径,但又不增大载流部分截面积的导线。例如, LGJK—300型扩径导线的铝线部分截面积为 $300.8\text{mm}^2$ ,相当于 JL/G1A—300/40;直径为 27.44mm,又相当于 JL/G1A—400/50。这种导线的结构如图 2-3 所示。它和普通钢芯铝线的不同在于支撑层并不为铝线所填满,仅有 6 股,而这 6 股主要起支撑作用。

分裂导线,又称复导线,每相导线由 2~4 根子(次)导线排列成一定几何形状并联形成,如图 2-4 所示。子导线间的距离称为子导线间距或分裂间距。这种分裂可使导线周围的电、磁场发生较大变化,减少电晕和线路电抗。分裂的根数越多,电抗下降也越多,但分裂根数超过 4 根时,电抗值的下降速度已逐渐减缓。

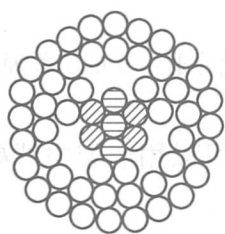


图 2-3 扩径导线



图 2-4 分裂导线

### 3. 导线的型号

导线的型号由字母和数字两部分组成,表明了导线的材料、结构和标称截面积。

字母部分位于前端,以汉语拼音的第一个大写字母表示导线材料和结构,例如同心绞合表示为 J,铝表示为 L,钢表示为 G,铜表示为 T, JL/G 表示钢芯铝绞线。

数字部分位于后端,表示导线的标称截面积,单位为  $\text{mm}^2$ 。钢芯铝绞线型号有两个数字,中间以斜线分离,前部为铝线的标称截面积,后部为钢芯的标称截面积。

各类架空线型号及说明见表 2-2。

表 2-2 各类架空线的型号及说明

导线种类	型号	型号举例及含义
铝绞线	JL	“JL—500—37”,由 37 根硬铝线绞制成的铝绞线,其标称截面积为 $20\text{mm}^2$
钢芯铝绞线	JL/G1A、JL/G1B、JL/G2A、JL/G2B、 JL/G3A	“JL/G1A—500/35—45/7”,由 45 根硬铝线和 7 根 A 级镀层普通强度镀锌钢线绞制成的钢芯铝绞线,硬铝线的标称截面积为 $500\text{mm}^2$ ,钢标称截面积为 $35\text{mm}^2$
铝合金绞线	JLHA2、JLHA1	热处理铝镁硅合金绞线/热处理铝镁硅合金稀土绞线
防腐型钢芯铝绞线	JL//G1AF、JL/G2AF、JL/G3AF	F—防腐性能
扩径钢芯铝绞线	LGJK	K—扩径型或空心结构
铝包钢绞线	JLB1A、JLB1B、JLB2	单股钢线外包铝层制成的绞线