

超高压远距离输电

CHAOGAOYA YUANJULI SHUDIAN

主 编 ⊙ 冉红兵 何光键 李仙琪



西南交通大学出版社

[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

内容简介

本书根据培养应用型职业技术人才的需要,针对我国南方电网交直流混联的实际所编写。本书详细介绍了高压直流输电、超高压远距离输电的运行与控制等内容,并根据国家电网输电技术发展的需要加设了柔性输电技术部分。本书既能全面反映电网企业运用的新技术、新设备尤其是输变电设备新技术的应用与发展,又能反映电力企业在技术方面的发展方向。本书可作输电和其相关专业的专业特色课程用书,也可作工程技术人员及职工培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

超高压远距离输电/冉红兵,何光键,李仙琪主编

—成都:西南交通大学出版社,2009.10

ISBN 978-7-5643-0477-5

I. ①超… II. ①冉… ②何… ③李… III. ①超高压—长线路—输电 IV. ①TM722

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第191038号

超高压远距离输电

主编 冉红兵 何光键 李仙琪

*

责任编辑 李芳芳

特邀编辑 张 阅

封面设计 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段111号 邮政编码:610031 发行部电话:028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蜀通印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸:185 mm×260 mm 印张:8.125

字数:202千字

2009年10月第1版 2009年10月第1次印刷

ISBN 978-7-5643-0477-5

定价:18.00元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话:028-87600562

前 言

随着能源开发、电能传输以及电力系统的规模不断扩大,通过大力发展西部水电、火电资源,西电东送,电力南北互供、全国联网,以实现全国范围内的资源优化配置和能源优化供给,是 21 世纪中国能源和电力工业建设的基本战略。力争到 2020 年,中国大规模西电东送和全国联网的目标基本实现,将逐步建成横贯东西南北、规模巨大的电力供应网络。随着电力系统的不断发展,采用高压直流输电的必要性也与日俱增,直流输电与交流输电相比,各有优缺点,两者可以取长补短,相互补充。在大功率远距离输电、海底电缆送电和交流系统非同步联系等方面,直流输电的优点尤为突出,从而使它成为电力系统中具有重要经济意义和技术意义的环节。

本书是根据培养应用型职业技术人才的需要,针对我国特别是南方电网交直流混联的实际,在吸收其他院校的相关教材及有关工程技术人员意见的基础上编写的。本书历经三轮修订,吸纳了国家电网的新建设与新技术,其编写思路为:① 根据《电力新技术》的部分、《高压直流输电工程技术》和收集的资料自编讲义,由于目前直流输电的书籍大多数是施工用书,理论讲解较少,因此我们采用了符合教学规律和实际应用的体系方式编写,增加了基本原理的介绍。② 课程讲义不断地补充和完善,在新型的直流输电技术之后,根据国家电网输电技术发展的需要加设了柔性输电技术部分。③ 本门课程是根据原来的技术讲座演变逐步形成教材,其培养内容以送变电线路职业技能鉴定规范上相关要求确定,以体现职业教育就是就业教育的原则。④ 本教材主要作为电力职业技术学院输电和其他相关电类专业的专业特色课程用书,也可以作为输电类职工培训用书。

全书分为 4 章,第 1 章、第 3 章、第 4 章由冉红兵和李仙琪编写,何光键编写了第 2 章并负责插图;本书在编写过程中得到了徐东飞副教授的无私帮助,得到了重庆大学王官洁教授的指导和帮助,在此一并表示感谢!

由于编者水平和实践经验所限,书中难免有不妥之处,欢迎读者提出宝贵意见。

编 者
2009 年 7 月

目 录

第 1 章 电力技术的发展	1
1.1 电力技术与电力工业体系	1
1.2 能源形势与能源开发	3
1.3 发输变技术的发展	7
第 2 章 高压灵活交流输电	11
2.1 高压交流输变电	11
2.2 500 kV 变电站	13
2.3 灵活交流输电(柔性输电)	22
2.4 常见的 FACTS 基本原理及应用	25
思考题	33
第 3 章 高压直流输电	34
3.1 概 述	34
3.2 高压直流(HVDC)输电的构成	39
3.3 换流技术	43
3.4 换流站的布置	52
3.5 换流站的主设备(晶闸管换流器)	53
3.6 换流站的主设备(换流变压器)	56
3.7 换流站的主设备(直流电抗器)	59
3.8 换流站开关设备(直流断路器)	61
3.9 换流站的主设备(谐波和滤波器)	62
思考题	79
第 4 章 超高压远距离输电的运行与控制	80
4.1 交、直流混合输电的稳定问题	80
4.2 交流线路的运行与控制	83
4.3 直流输电线路	100
4.4 高压直流系统的控制	113
4.5 HVDC 和 FACTS 的发展前景	119
思考题	123
参考文献	124

第 1 章 电力技术的发展

1.1 电力技术与电力工业体系

1. 电的起源

1831 年, 法拉第发现了电磁感应定律, 奠定了发电机的理论基础。电力技术历史上的三大发明是:

(1) 1866 年, 西门子发明了励磁电机, 并预言: “电力技术将会开创一个新纪元。”

(2) 1876 年, 贝尔发明了电话, 解决了电能通过线路输送的问题。

(3) 1879 年, 爱迪生发明了电灯。

这三大发明照亮了人类实现电气化的道路, 引起了电力技术革命。

2. 电力工业的技术体系

(1) 1882 年, 爱迪生建成世界上第一座发电厂, 共有 6 台直流发电机, 通过 110 V 电缆供电, 送电距离 1.6 km、供 6 200 盏白炽灯照明用。

(2) 1881 年, 卢西恩·高拉德和约翰·吉布斯取得“供电交流系统”(二次发电机) 专利。1884 年, 发明家乔治·威斯汀豪斯买下此专利, 并在此基础上于 1885 年制成交流发电机和变压器, 于 1886 年建成第一个单相交流送电系统。

(3) 1891 年, 在德国劳芬电厂安装了世界第一台三相交流发电机, 建成第一条三相交流送电系统。三相交流电克服了直流供电容量小、距离短的缺点, 开创了远方供电的新局面。

1.1.1 电力工业体系

1. 工业体系

电力工业体系包括以动力为主要特征的发电厂, 如水电厂、火电厂、核电厂等; 以输电线路、变电站和用户为主要业务范围的供电局; 还成立了为保障电力系统(即整个电力工业)安全稳定运行的各级指挥机构, 如图 1.1 所示。

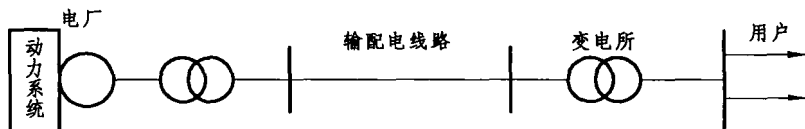


图 1.1 电力工业体系

2. 理论体系

根据技术的发展,形成了直流电路、单相交流电路、三相交流电路等电路理论;电路与磁路等电磁应用理论;网络与电力系统分析理论等。

1.1.2 电力工业发展趋势

1. 电力工业的市场化体制改革

在 20 世纪 80 年代末 90 年代初,美国和英国发起了电力工业市场化体制改革,即所谓自由化、民营化、放松管制、打破垄断、引入竞争机制。其目的是为了保证可靠、长期、充足的电力和优质的服务、合理的价格、符合环境标准、面向更广泛的用户。

2. 更加广泛地使用电力

从发达国家几十年的实践来看,电力增长越快,总的能源需求增长越慢;电力占终端能源比重越大,单位产值的能源消费(即能源强度)越低。但是,电力替代煤炭、石油、天然气、燃气和秸秆等能源的速度,决定于世界各国对生态环境的要求和经济水平,决定于石油、天然气的可供应能力以及电力对其他能源的竞争能力。我国目前的电气化水平还很低,按计算我国 1990 年电能终端能源中的消费比重约为 7.5%,而经济合作组织国家平均为 15%,大致相差一半。

3. 电力工业把注意力转向燃气蒸汽联合循环发电

电力工业初期主要依靠水电和凝汽式火力发电站,工业发达国家水能资源大部分开发后,电力发电技术在狭窄的领域里进行,即不断提高汽轮发电机的温度、压力,由低温低压、中温中压、高温高压向亚临界、超临界的方向发展,采用更大型的发电机、汽轮机和锅炉。但是 20 世纪 60 年代以后,凝汽式发电机技术几乎没有多大进展,电站的平均效率稳定在 35% 左右。为此,工业发达国家开始把发展方向转向核电,但是 1979 年的三哩岛事故和后来的切尔诺贝利事故,对核电站的安全提出了更高的要求,核电造价急剧上升,带动了核电电价上升,核电开始冷却下来了。

这时燃气蒸汽联合循环电站的造价降低到燃煤凝汽式电站的一半左右,效率提高到 55%~60%,建设工期降到几个月,大型联合循环电站可以做公用发电厂;小型的可作热电冷联产发电装置。用天然气作燃料发电,氮氧化物可削减 90%, SO_2 可减少为 0;更由于天然气供应充足、价格下跌且燃料来源广泛,于是成为世界各国步入 21 世纪可持续发展的桥梁。

4. 大力发展洁净煤技术

在化石能源中,煤炭的储量最为丰富,在可预见的将来,世界还不可能减少煤炭的消费量,为了解决煤炭利用对生态环境的不利影响,一个可行的选择是选择发展洁净煤技术。

5. 大力发展可再生能源发电

为减少 SO_2 的排放量,工业发达国家都十分重视可再生能源的发电利用。可再生能源包

括水能（水力发电）、太阳能、风能、地热能、海洋能（包括潮汐能、波浪能、洋流能、温差能等）、生物质能。中国和大多数发展中国家水能资源的开发程度都较低，可供开发的优越水力地址还很多，在开发再生能源发电中，应把加快开发水电放在突出的位置。

6. 提倡分散的电力工业

最近国际上一些学者和国际组织认为：大容量、高参数机组发电，超高压、大电网远距离输电的集中供电是一些工业发达国家电力工业过去走过的道路。最近在布鲁塞尔成立的国际热电联产（ICA）的国际电力组织声称：“电力工业在 2015 年前将发生根本的变化……，大型和远离负荷中心的电厂将越来越多地被靠近负荷中心的小型 and 清洁的发电方式所代替。这些负荷中心将减少对昂贵的远距离输电线路的需求。”预计冷热电联厂将成为未来的分散电力工业的主要模式。

7. 积极推广电力需求侧管理

传统的电力工业只进行电力供应侧管理，是做电力供应侧规划，把电力需求侧看做是凝固不变的，完全依赖电力供应侧去满足需求侧的需要。但是 20 世纪 70 年代两次石油危机之后，一些能源分析专家得出结论：电力需求受价格的影响（称为价格源性），价格越高，用电量越少；相反降低电价就可以增加用电量；因此电力需求并不是凝固不变的，合理的电价结构可以改变电力负荷曲线的形状。如果电力公司和电力用户都进行投资，提高用电效率，改变用电方式，可以在不影响用户舒适度的条件下，减少电力消费、抑平负荷曲线、提高负荷率，这样电力公司和电力用户的经济情况都可以获得改善。

1.2 能源形势与能源开发

1.2.1 世界能源发展状况

18 世纪中叶，蒸汽机的发明引发了第一次工业革命，促进了煤炭工业的发展。第二次世界大战后，石油和天然气也获得迅速发展，据《2000 世界能源统计评论》资料，一次能源消费比例是石油 40.5%、天然气 24%、煤炭 25%、核能 8%、可再生能源 2.5%，即化石燃料约占总能源的 89.5%。

随着世界经济的持续发展和人口的快速增长，世界能源消费总量也会不断增长，但是有限的石油、天然气和煤炭资源是无法长期满足世界能源需求的。据相关资料统计，1998 年世界原油储量约为 10 347 亿桶，若按平均每天产油 6 621 桶（98 年数值），已探明的石油只能开采 43 年；1998 年世界确认的天然气储量约为 145.65 Mm^3 ，天然气产量为 2.34 Mm^3 ，世界天然气只能供人类开采 62 年。煤炭资源储量约为 $9\,842 \times 10^9 \text{ t}$ ，1999 年煤炭产量为 43.45 亿吨，探明煤炭的可采储量可供开采 200（240）年。

由此可见，21 世纪的中叶，石油和天然气的短缺将使煤炭液化燃料比例增加，煤炭可能成为承上启下的过渡能源。为此，世界各国都加强了可再生能源的开发研究，如以色列的太

太阳能热水器普及率达 70%，世界风力发电装机已达 1 245 万 kW，法国的朗斯潮汐电站已运转多年。到 21 世纪中叶，可再生能源将占世界能源结构的 30%以上。可以预计，世界以化石燃料为主体的能源结构将逐步转变成以可再生能源为主体的能源结构。

1.2.2 我国能源基本情况

我国有着丰富的能源资源，世界各国有的能量资源我国都有。我国煤炭资源（探明储量）和水力资源均居世界第一位，石油资源占世界第十一位，天然气资源占世界第十四位，太阳能资源居世界第二位，潮汐、地热、风力和核燃料资源都很丰富。但我国人均占有量却很少，只有世界平均水平的一半，且能源资源地区分布不均衡。1985 年，煤炭探明储量 7690 亿吨，主要集中在华北和西北，各占 59.3%和 19.2%，西南占 9.6%，华东占 5.8%，中南 3.4%，东北 2.7%。石油探明储量 25 亿吨，天然气储量 3 800 亿立方米，主要分布在黑龙江、辽宁、河北、河南、山东、四川、甘肃和新疆等地。可开发水力资源有 3.78 亿千瓦，年发电量 1.92 亿千瓦时，主要集中在西南，占 68%，中南占 15.2%，西北占 10%，华东占 3.6%，东北占 2%，华北占 1.2%。我国太阳能和风能资源丰富，有很大利用潜力。

我国能源形势具有三大特征：① 人均能源不足，人均煤炭探明储量为世界的 51.3%，石油为 11.3%，天然气只有 3.78%。商品能源消耗量约为世界均值的 55%（高于发展中国家均值），为发达国家的 1/6，家庭用电量只有美国的 2.4%。我国是世界上最大煤炭生产国与消耗国，煤炭提供了 70%的工业燃料与动力、60%的化工原料、80%的民用商品能源；能源较丰富，但人均不足。② 一次能源分布不均，煤炭探明储量中，山西、内蒙及陕西占 65.2%；可开发水能 67.8%集中在西南地区；松辽、渤海湾、塔里木盆地和准葛尔盆地的石油占全国的 52.6%；天然气总储量 2/3 分布在中西部，而经济发达的东南沿海地区则缺乏能源。③ 我国能源利用效率低，能源系统总效率 = 32%（开采效率）× 70%（加工、储运、转换效率）× 41%（终端利用效率）= 9.2%，不及发达国家的 1/2。发电用能源占一次能源的比重低（电是优质、高效、可靠、清洁的二次能源），1992 年的统计数据：加拿大 60.8%、法国 53.6%、英国 36.6%、日本 51.2%、德国 36.9%、意大利 32.2%、美国 43.8%、中国 28.8%（1990 年 23.1%）。

1.2.3 我国的能源开发情况

1. 发电能源开发

我国水能约有 680 MkW，其中可开发的约 400 MkW，占世界水能的 1/6，居世界首位，但水电开发还不到 10%；水电占电能比例为 27%~28%。我国是世界最大的煤炭生产国与消耗国，煤炭储量 6.4×10^{13} t，1995 年煤保有量 $10\,087.08 \times 10^9$ t、1 500 m 地下煤炭 $40\,000 \times 10^9$ t；开发火力（煤和石油）占电能 70%~80%。我国的常规能源是水电和火电的开发，因此未进行核电开发，一直到 1981 年 30 几位科学家提出节约能源的措施之一——核能开发，负荷大的地区开发核电；开发核电占电能的 2%~3%，其他如太阳能、地热、风力、潮汐均为小容量试制阶段。

2. 我国的水能资源

中国河流水能资源储量有 676 MkW（分布在十大流域），可供开发的水能资源达 378 MkW，无论储量还是可开发的水能，均为世界第一；据统计，目前只开发了 8.15%。

1989 年，中国水利水电规划设计院编制了《十二大水电基地》的规划性文件。他们是：① 金沙江水电基地；② 雅砻江水电基地；③ 大渡河水电基地；④ 乌江水电基地；⑤ 长江水电基地；⑥ 南盘江、红水河水电基地；⑦ 澜沧江水电基地；⑧ 黄河上游水电基地；⑨ 黄河中游水电基地；⑩ 湘西水电基地；⑪ 闽、浙、赣水电基地；⑫ 东北水电基地，规划总装机容量为 21 047.25 万千瓦。我国的水能资源大有前途，要着力扭转水电比重偏低的局面。

3. 核能——21 世纪的新能源

核能的和平利用，对于缓解能源紧张，减轻环境污染具有重要的意义。

(1) 核裂变能：重原子（如铀）分裂成几个原子核产生链式反应，释放出巨大能量。

(2) 核聚变能：两个较轻原子核（如氢的同位素）聚合成一个较重的原子核，释放出巨大能量。

核能的优点：

(1) 能量密度大，燃料用量少（ 100×10^4 kW 压水堆核电站 30 t 核燃料可用 3 年）。

(2) 由于核电站的设计标准较高，因此安全、可靠并能减轻环境污染。

(3) 核燃料储量丰富，因此价格比较稳定。随着核聚变技术的研发，轻核燃料可取之不尽。

我国核电开发情况：

1983 年国家建设了第一座核电站——秦山核电站（2 900 MW）之后，广东大亚湾核电站（1 800 MW）、广东岭澳核电站（2 000 MW）、江苏田湾核电站（2 000 MW）相继建成；在中国第九个五年计划期间（1996—2000 年），中国核电进入了小批量建设阶段，每年都有一个新项目开工。秦山二期、岭澳、秦山三期、田湾这四个项目 8 套机组在 2002 年至 2005 年相继建成，部分机组目前已投入商业运行。到 2005 年，我国核电在役装机容量将达到 870×10^4 kW，核发电量将占全国总发电量的 3% 左右。同时，山东海阳、辽宁、福建惠安、浙江三门、江西彭泽、广东阳江均准备建设核电站。

4. 新能源开发

常规能源为技术上比较成熟，已被人类广泛利用，在生产和生活中起着重要作用的能源，如煤炭、石油、天然气、水能和核裂变能等。新能源为目前尚未被人类大规模利用，还有待进一步研究试验与开发利用的能源，如太阳能、风能、地热能、海洋能及核聚变能等。

1) 太阳能利用进入新的发展阶段

太阳能的利用技术进入新的发展阶段。国内太阳能热利用方面，主要有太阳能热水器、太阳灶、被动式太阳房和太阳能干燥器。经过十年的努力，我国太阳能热利用技术在这四个领域已基本过关，科技成果不同程度地转入小批量生产，有了一定数量推广应用的覆盖面，在缓解当地常规能源短缺、减轻生态和环境恶化等方面收到了实效。据 1993 年的不完全统计，全国已推广太阳能热水器 230×10^4 m²，被动式太阳房 180×10^4 m²，太阳能农作物温室 34.2

万公顷，太阳灶 14 万台，太阳能干燥器 13 200 m³，并一直保持发展势头。国产太阳能热水器平均每平方米每年可节约 100~150 kg 标准煤，其节能、社会效益十分明显。

我国的太阳能光伏发电应用始于 20 世纪 70 年代，但直到 1982 年以后才真正发展起来。在 1983 年到 1987 年短短的几年内先后从美国、加拿大等国引进了七条太阳能电池生产线，使我国太阳能电池的生产能力从 1984 年以前的年产 200 千瓦跃到 1988 年的 4.5 MW。在应用方面，我国目前太阳电池主要用于通信系统和边远无电地区，年销售约 1.1 MW。特别是我国迄今尚有 28 个无电县，上千个无电乡村，成千个无电岛屿，对解决这些边远偏僻地区供电需求，光伏发电已经并将更有效地发挥作用。目前西藏的 9 个无水力发电县中，已建成 2 个功率分别为 10 kW 和 4 kW 的光伏电站，其余 7 个已纳入国家计划正在兴建之中。在太阳电池研究方面，实用型单晶硅电池效率达 12%~13%，多晶硅电池效率为 9%~10%，非晶硅电池效率为 5%~6%。虽然高效硅电池及非晶电池的实验室水平与国外相差不大，但在向生产力转化方面却差得很多，有些新型且有潜力的太阳能电池的研究国内尚属空白。

2) 风能开发利用继续发展

我国风力发电总装机容量达到 2.6×10^4 kW。20 世纪 80 年代以来，50~200 W 的微型风力发电机相继研制成功并投入批量生产，目前约有 12 万余台在内蒙古、新疆、青海等牧区草原和沿海无电网地区运行，解决了渔、牧民看电视和照明问题。1~20 kW 中、小型风力发电机组达到小批量生产阶段，目前正在研制 50~200 kW 中、大型风力发电机，有 14 个风电场正在建设当中。与此同时，低扬程大流量和高扬程小流量两种新型风力提水机已研制成功。此外，在全国风能资源调查，风力机性能测试技术基础理论研究、风能综合利用、国外风力机引进技术的消化吸收及风电场的试验运行方面均取得进展。

3) 其他新能源和可再生能源的开发利用

其他新能源和可再生能源的开发利用，也有了一定的发展。我国地热资源现已利用的相当于 400×10^4 t 标准煤。值得一提的是我国西藏的地热开发利用，羊八井地热电站现装机总容量 2.5×10^4 kW，年发电量达 9 700 万度电，为拉萨电网供电的 50%，是我国目前最大的地热电站。氢能等极用应用前景的新能源技术开发尚处于实验室试验研究阶段。

近 20 年来，我国新能源和可再生能源的开发利用有很大发展，已经成为现实能源系统中不可缺少的组成部分。目前各类新能源和可再生能源，年提供约 3 亿多吨标准煤（其中大部分是生物质能，在目前的商品能源统计数字中并未计入），这对促进国民经济发展和满足广大农村和边远地区人民生活的能源需求起到了重要作用，见表 1.1。

表 1.1 中国新能源与可再生能源及其发电等应用现状

序号	能源类型	项 目	应 用 现 状
1	小水电	小水电	全国共建成小水电站 4.8 万座，总装机容量 24.8 GW，年发电 800 kWh
2	太 阳 能	太阳能热水器	全国太阳能热水器保有量达 2 600 万 m ² ，是世界上最大的太阳能热水器产销国
		太阳灶	全国太阳灶累计保有量达 33.2 万台，居世界第一位
		太阳房	全国已建成太阳房约达 $1\,800 \times 10^4$ m ²
		太阳能电池	全国太阳能电池发电装置累计装机容量约达 20 MW

续表 1.1

序号	能源类型	项目	应用现状
3	风能	独立型风力发电机组	全国累计安装独立型风力发电机组约达 19.8 万台，总容量 $5.28 \times 10^4 \text{ kW}$
		并网型风力发电机组	全国已建成并网风力发电场 26 座，总装机容量 $34.433 5 \times 10^4 \text{ kW}$
4	生物质能	家用沼气池	全国已累计推广家用沼气池 763.7 万个，产气 $25.9 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，居世界之首
		生活污水净化沼气池	全国已建成生活污水净化沼气池 49 322 个
		大中型沼气工程	全国已建成大中型畜禽养殖场能源环境沼气工程 1 000 多处，产气 $10 \times 10^9 \text{ m}^3$
		秸秆气化	全国已建成秸秆气化集中供应点 388 处，产气 1.5 亿 m^3
		蔗渣发电	全国已建成蔗渣发电工程 >800 MW
5	地热能	地热发电	全国已建成地热发电约 27.78 MW，其中西藏羊八井地热电站装机 25.18 MW
		地热直接利用	全国约有地热直接利用点 1 300 多处，利用总量达 2 443 MW，其中利用量最大的是地热采暖，全国已营运的冬季地热供热系统的供热面积超过 $1\,000 \times 10^4 \text{ m}^2$
6	海洋能	潮汐发电	全国已建成潮汐电站 8 座、潮洪电站 1 座，总装机容量 10.65 MW

1.3 发输变技术的发展

1.3.1 发电机技术的发展

1. 发电机技术的发展史

发电机从发明开始，经历了直流电机——励磁电机——变压器——交流发电机的发展历程，如图 1.2 所示。

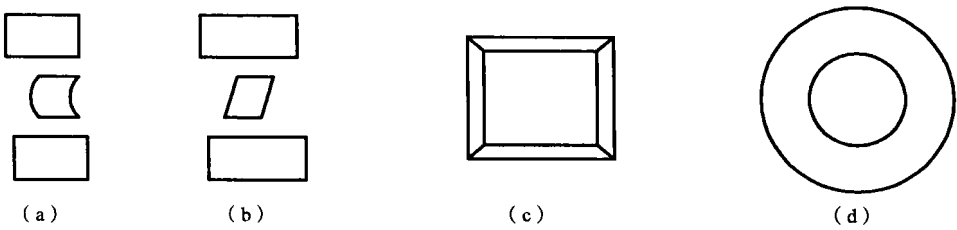


图 1.2 发电机的发展历程

2. 高效发电技术应用（见表 1.2）

表 1.2 我国火力电厂的参数和机组容量的关系

电厂参数类型	汽轮机气压/Pa	汽轮机气温/°C	机组容量范围/MW
中温中压	34×10^5	435	6 ~ 50
高温高压	88×10^5	535	25 ~ 100
超高压	132×10^5	535	125 ~ 200
亚临界压力	167×10^5	535	300
超临界压力	241.3×10^5	538/538	600

最早的汽轮机是低温低压机组，随着技术进步，逐渐过渡到中温中压——高温高压——超高压——亚临界压力——超临界压力。超临界压力机组的热效率可提高到 40%，而超超临界压力可提高到 44%。

1973 年瑞士 BBC 公司为美国生产双轴 $130 \times 10^4 \text{ kW}$ 机组，1980 年苏联生产单轴 $120 \times 10^4 \text{ kW}$ 机组，西方国家和日本可生产 $80 \times 10^4 \text{ kW}$ 超超临界。

3. 冷却技术

定绕、转绕、铁芯；冷却介质：空冷——外冷、氢冷（导热能力为空气的 5 倍）——外冷与内冷；水冷（导热能力为空气的 50 倍）——内冷；油冷（导热能力为空气的 21 倍）；美国氢冷技术好、俄罗斯冷却技术全面。

4. 煤炭洁净燃烧发电技术

(1) 燃烧前处理：主要有洗选煤、型煤、煤的气化、液化等。

(2) 燃烧中的清洁利用（过程处理）：主要指硫化床燃烧技术、整体煤气化蒸汽联合循环、磁流体发电技术等。

(3) 燃烧后清洁处理：除尘、脱硫（有上百种方法）、脱硝、废水处理及排放、灰渣综合利用。

5. 清洁能源、可再生能源与新型发电机

(1) 清洁能源、可再生能源有水力发电技术和核电技术。

(2) 新型发电机有超导体发电机和磁流体发电机（天然气、石油、核燃烧产生等离子导电导体通过强磁场产生电能）。

1.3.2 变压器技术的发展

1. 技术发展史

1851 年俄国人列姆勒夫发明了“二次发电机”；1884 年法国高拉德和英国吉布斯进行了“二次发电机”表演，美国威斯汀豪斯买下此专利；现已发展为电力变压器和特种变压器（试

验、整流、船用)。

2. 电力变压器的分类

按用途分：升压、降压、联络、厂用、配电。

按相与线圈数分：单相和三相、双线圈、三线圈、自耦变。

按冷却方式分：油浸自冷、油浸风冷、油浸水冷、强迫油循环风冷、强迫油循环水冷、干式空气自冷。

按导线材料分：铜制和铝制两种。

按调压方式分：无激磁调压、有载（激磁）调压。

1.3.3 输电线路技术的发展

1. 电网技术的发展

$$\Delta P=3I^2R=P^2/U^2\cos^2\Phi\times\rho l/S$$

① 提高 U ；② 提高 $\cos\Phi$ ；③ 减小 ρ 或增大 S 。

我国现行的电力网额定电压标准为：3 kV、6 kV、10 kV、35 kV、110 kV、220 kV、500 kV、 ± 500 kV 等。

低压网络 1 kV —— 380/220 V 低压系统。

高压网络 1~220 kV —— 电弧、开关与灭弧装置。

超高压网络 330~1 000 kV —— 电晕现象、分裂导线。

特高压网络 1 000 kV 以上 —— 美国 765 kV 线路运行、日本（1996 年）1 000 kV 线路降压运行。

2. 各级电压等级与线路输送容量及输送距离的关系（见表 1.3）

线路额定电压/kV	输送容量/MW	输送距离/kM	备注
0.38	0.1	0.6	
3	0.1~1.0	1~3	
6	0.1~1.2	4~15	
10	0.2~2.0	6~20	
35	2.0~10.0	20~50	
110	10.0~50.0	50~150	
220	100.0~300.0	100~300	
500	800.0~2 000.0	400~1 000	
± 500		850 以上	

3. 新型输电技术

在电力工业的萌芽阶段，以爱迪生（1847—1931）为代表的直流派力主整个电力系统从

发电到输电都采用直流；以西屋（1884—1914）为代表的交流派则主张发电和输电都采用交流。由于多台交流发电机同步运行问题的解决以及变压器、三相感应电动机的发明和完善，交流系统在经济技术上的优越性日益突出，最终取得了主导地位。在发电和变压问题上，交流有明显的优势；但是在输电问题上，直流有交流所没有的优点：

（1）由于交流系统的同步稳定性问题，大容量长距离输送电能将使建设输电线路的投资大大增加，当输电距离足够长时，直流输电的经济性将优于交流输电。

（2）由于现代控制技术的发展，直流输电通过对换流器的控制可以快速地调整直流线路上的功率，从而提高交流系统的稳定性。

（3）直流输电线路可以连接两个不同步或频率不同的交流系统。

由于这几条主要优点，直流输电的竞争力日益提升，发展到今天，现代电力系统已成为交流系统中包含直流输电系统的交直流混联系统。

对于新建设的输电线路，采用高压直流输电技术（HVDC）是解决长距离大容量输送电能的一个途径。但是对于已建成的交流输电线路，尽可能地提高其输送能力也是一个重要途径。由于已建成的电力网中，交流输电线路条数远多于直流输电线路条数，因而对交流输电线路进行适当的技术改造，从而大幅度地提高它们的效力可能比建设新的输电线路在经济上更为可行。

柔性交流输电系统（FACTS）也称柔性输电技术或灵活输电技术，其概念最初由美国学者亨高罗尼提出，约形成于 20 世纪 80 年代末。柔性输电技术是利用大功率电力电子元器件构成的装置（控制器及其他静止型控制器）来控制或调节交流系统的运行参数和网络参数从而优化电力系统的运行状态，提高电力系统输送能力的技术。显然，高压直流输电技术也满足以上定义。但是，由于高压直流输电技术已独立发展成一项专门的输电技术，故现今所谓的柔性输电技术不包括高压直流输电技术。

柔性交流输电技术和高压直流输电技术的基本特点都是控制十分迅速，因此研究 HVDC 和 FACTS 在各种运行工况下的分析方法、控制技术及含有 HVDC 和 FACTS 的电力系统的潮流计算及控制策略将成为电力科学研究的重要领域。

思 考 题

- 1.1 简述科技革命对国家盛衰的影响。
- 1.2 简述电力技术起源的三大发明对电力技术革命的作用。
- 1.3 简述世界的能源形势与我国能源的三大特征。
- 1.4 简述高压输电与低压配电的意义，并说明远距离输电的优势。
- 1.5 试述电力工业的发展趋势。
- 1.6 试述电力技术的发展与电力技术理论发展的关系。

第 2 章 高压灵活交流输电

2.1 高压交流输变电

2.1.1 概 述

随着用电需求不断增长,大型水电厂、火电厂和核电厂的建设,地区间电源与负荷的不平衡以及经济调度的需要,要求发展高压输电网,电压等级也随之逐步提高。从最初较低电压的 6~10 kV 经历 35 kV、110 kV 和 220 kV,发展到超高压的 330 kV、500 kV 和 750 kV 电网,并且还有继续上升的趋势。概括起来,影响输电电压等级发展的主要有以下原因:

1. 长距离输送电能

由于大容量发电厂的建设地点一般远离负荷中心,如果采用低压输电,势必造成输送功率的巨大浪费和电能质量的下降,因此,提高输电电压等级就成为必然的选择。

我国自行设计和施工的第一回 220 kV 松(丰满水电厂)东(虎石台变电站)李(李石寨变电站)线路,全长 369.25 km,于 1954 年 1 月竣工并投入运行,为丰满水电厂送出线路。我国 330 kV 第一回线路的首次出现是由刘家峡水电站向关中送电。美国首次 500 kV 线路输电是 1965 年俄勒岗州水电站向旧金山送电。我国 500 kV 线路在各电力系统的出现也都与电源送出密切相关。

不同电压等级输电线路的经济输送容量和输送距离的关系见表 2.1。

表 2.1 不同电压等级的输送容量和输送距离

电压等级 /kV	输送容量 /MV·A	输送距离 /km	电压等级 /kV	输送容量 /MV·A	输送距离 /km
10	0.2~2	6~20	330	200~800	200~600
35	2~15	20~25	500	1000~1500	150~850
110	10~50	50~150	750	2000~2500	500 以上
220	100~500	100~300			

2. 大容量输送电能

随着电力系统发电容量的增大,特别是大型坑口火电厂和核电厂的投产,尽管输电距离不长,但输送容量很大,也需要采用较高的电压等级,如美国某电力系统为配合坑口火电厂(5 台 80×10^4 kW 机组)和核电厂(2 台 110×10^4 kW 机组)的投产,在原有 345 kV 电压之上

采用 765 kV 的输电电压。

3. 节省基建投资和运行费用

如果以输送每千米每千瓦电力的线路造价作为单位造价，则在各级电压相应的经济输送容量范围内，线路的单位造价将随输送电压等级的升高而降低。在长距离输电线路中，变压器造价所占比重较小，即使按输送距离 300 km 计算，包括变电设备造价在内的 750 kV 输电线路的单位造价，仅为 330 kV 的 50% 左右。

在相同的输送容量和距离的条件下，输电线路的总损耗（包括电阻损耗和电晕损耗）随输电电压等级的升高而降低。如表 2.2 所示，750 kV 线路的线损率约为 330 kV 线路的 1/2。

表 2.2 电压等级与线损率的关系

电压等级/kV	导线截面/mm ²	输送容量/MW	线损率/%
220	1×570	250	2.75
330	2×270	700	1.30
500	4×570	1 200	0.95
750	4×570	2 500	0.70

此外，输送相同容量电力的线路走廊的宽度，也随着采用电压等级的升高而降低。走廊占地费用在线路总造价中所占比重较大（如美国东部地区 500 kV 线路约占线路总造价的 15%~30%），为减少走廊占地费用，采用超高压输电也就在所难免。

4. 电力系统互联

电力系统的发展，必然会打破历史形成的地方电力系统的疆域，逐渐连成大区域或跨区域的联合电力系统。也只有依靠联合电力系统才能把诸如水能、煤炭、石油、天然气、核能等一次能源转化为电能，并把它们有效地联系在一起，通过长距离输送，进行分配，互相支援，彼此配合，取得最大的经济效益。

为了增强电网输送能力，提高系统的运行稳定性，大区电力系统连接多采用 500 kV 或 750 kV 超高压电压等级，甚至采用 1 150 kV 的特高压电压等级（如俄罗斯）。

2.1.2 我国 330 kV 及以上超高压输电

1972 年我国第一回 330 kV 线路正式投入运行，该线路经甘肃泰安变电站至陕西省关中地区汤峪变电站，全长 534 km，可将刘家峡水电厂的电力送入西北电力系统，揭开了我国超高压输电史的第一页。以刘家峡水电厂为中心的西北 330 kV 电力系统，不仅使我国的输电电压等级从高压跃升至超高压，而且促进了我国电力设备制造和运行管理水平的提高，为后来的 500 kV 和 750 kV 输变电发展打下了基础。

由河南省姚孟电厂经双河向武汉送电的我国第一回 500 kV 线路[平（顶山）武（汉）线]，全长 595 km，于 1981 年在华中电力系统建成并投入运行。随后东北、华北、华东等大区电

力系统也相继建设了多条 500 kV 线路，在消化引进国外 500 kV 输电技术的基础上，经过研制，我国已成批生产 500 kV 输变电设备。目前我国已经建成的华中、华东、华北、东北、南方电力系统，都是以 500 kV 网络作为其主干网络，跨大区电力系统互联也采用了 500 kV 交流输电技术。

2003 年 9 月 19 日，西北 750 kV 官亭至兰州东输变电工程正式开工。这不仅是我国电力系统输变电电压等级的一次历史性跨越，而且对加强西电东送北通道建设，加快黄河水电和新疆、宁夏、陕北火电外送具有重要意义。

30 多年来超高压输电系统的发展，初步显示了超高压的作用：进一步提高了电网输送能力，提高了系统运行稳定性；使大区电力系统内各省电力系统之间，跨大区电力系统间起到了电力余缺调节、水电和火电互补、事故时相互支援的作用。此外，通过在山西、内蒙等省（区）煤炭基地建设坑口火电厂，变输煤为输电，大大减轻了铁路运输压力，对国民经济具有深远的意义。

2.2 500 kV 变电站

2.2.1 500 kV 变电站电气主接线

变电站电气主接线指的是变电站中汇集、分配电能的电路，通常称为变电站一次接线，是由变压器、断路器、隔离开关、互感器、母线、避雷器等电气设备按一定顺序连接而成的。

为了便于运行分析与操作，变电站的主控制室中，通常使用了能表明主要电气设备运行状态的主接线操作图，每次操作预演和操作完成后，都要确认图上有关设备的运行状态已经正确无误。

电气主接线是整个变电站电气部分的主干，电气主接线方案的选定，对变电站电气设备的选择，现场布置，保护与控制所采取的方式，运行的可靠性、灵活性、经济性，检修、运行维护的安全性等都有直接的影响，因此，选择优化的电气主接线方式，具有特别重要的意义。

500 kV 变电站是电力系统的枢纽站，在电力系统中的地位极为重要，其安全可靠运行将直接影响整个系统的安全稳定运行。因此，对 500 kV 变电站可靠性要求较高。目前，我国 500 kV 变电站的电气主接线一般采用双母线四分段带专用旁路母线和 3/2 断路器两种接线方式，从发展看，后者比前者更被认同和广泛使用。

如图 2.1 所示，两组母线 W1 和 W2 间有两串断路器，每一串的三组断路器之间接入两个回路引出线（如 WL1、WL2），处于每串中间部位的断路器称为联络断路器（如 QF2），由于平均每条引出线装设一台半断路器，故称为一台半断路器接线。如断路器串在三串及以上，则引出线隔离开关（如 QS11）可以取消，以节约投资。

由图 2.1 看出，600 MW 汽轮发电机与主变压器接成发电机—变压器单元接线方式，发电机出口不装断路器，将发电机的额定电压 20 kV 经三台单相双绕组、总容量为 $3 \times 240 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 主变压器升高至 500 kV。