

世界大型电网发展

SHIJE DAXING
DIANWANG FAZHAN
BAIJIAN HUIMOU YU ZHANWANG

百年回眸与展望

编撰委员会、编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

世界大型电网发展

SHIJIE DAXING
DIANWANG FAZHAN
BAINIAN HUIMOU YU ZHANWANG

百年回眸与展望

编撰委员会、编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

为了充分发挥现代电网在能源转型发展过程中的重要作用,探索电网未来发展趋势,特编写本书。本书对当今世界分布于五大洲的九个大型电网从有电开始到目前的发展过程进行了回顾总结,归纳整理出不同历史时期的特点,分析研究了推动电网发展的动因,同时结合当前智能电网发展的新兴技术,对九个大型电网的发展趋势进行展望。内容力求通俗易懂,兼具电网专业性和电力科普性。

本书适用于从事电网调度运行、规划研究的专业人员以及相关的管理人员,也可供电力专业的学生、教师、电气工程师学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

世界大型电网发展百年回眸与展望/《世界大型电网发展百年回眸与展望》编撰委员会编著. —北京:中国电力出版社, 2017. 7 (2017. 8重印)

ISBN 978-7-5198-0003-1

I. ①世… II. ①世… III. ①电网—概况—世界 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 268470 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 刘 丹 高 芬 (dan-liu@sgcc.com.cn)

责任校对: 常燕昆

装帧设计: 张俊霞 张 娟

责任印制: 邹树群

印 刷: 北京瑞禾彩色印刷有限公司

版 次: 2017 年 7 月第一版

印 次: 2017 年 8 月北京第二次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 26

字 数: 426 千字

印 数: 5001—7000 册

定 价: 198.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前言

1879年10月22日，美国著名发明家托马斯·爱迪生在他位于新泽西州的实验室，“电”亮了世界上第一盏照明灯具，人类从此揭开了进入电气化时代的序幕！在经历了起步阶段交流与直流电力技术的短暂纷争后，尼古拉·特斯拉发明的交流电脱颖而出，从而使电网沿着大规模、高效率、更安全、更经济的道路阔步前进，源源不断地为社会发展注入强大的动力，成就了社会电气化和现代化的大电网。回眸130多年电力发展的历程，可谓是科技进步日新月异，创新发展势不可当。

进入21世纪以来，特高压工程取得全面突破，智能电网技术蓬勃兴起，清洁能源装机增长迅猛，推动能源转型发展的步伐不断加快。电网作为各类一次能源赖以转换、传输和使用的电力配置系统，经历130多年的发展已经成为连接千家万户的现代社会基础设施。为了研究探索电网发展的客观规律、充分发挥现代电网在能源转型发展过程中的重要作用，本书对当今世界分布于五大洲的九个大电网的发展过程进行了回顾总结，归纳整理出不同历史时期的特点，分析研究了推动电网发展的动因，同时结合当前智能电网新技术，对九个大电网的发展趋势进行展望。特别是本书还紧密结合我国电力“十三五”发展规划的前期研究，提出了适应我国能源转型发展要求的国家电网发展蓝图和分两个阶段实施的规划步骤。

本书分析研究的九个大电网覆盖区域既包括北美、西欧、澳大利亚、日本等发达地区和国家，也包括俄罗斯、印度、巴西、南非、中国等发展中国家。不论是系统规模还是电网技术，都代表了当今世界电网发展的最高水平。本书的着力点不在于对具体技术细节进行研讨，重点是对电网发展的内



在规律进行探索。通过对这九个大型电网的发展过程进行分析研究，我们可以清楚地看到，虽然每个电网所处地区的能源资源禀赋、经济社会发展水平各有不同，但其网架由弱到强、规模由小到大、电压等级由低到高、输电距离由近到远的发展过程及其内在驱动力和未来发展趋势都是基本相同的，即：通过不断扩大电网规模、不断增强电网供电能力（优化资源配置能力）、不断提升电网的安全可靠性，以更安全、更优质、更高效的供电服务来满足不断增长的用电需求，始终是推动电网发展的内在动力，而以清洁能源电力为主导的坚强智能电网则是未来电网发展的共同趋势。

本书编撰委员会主任刘振亚贡献了他在能源互联网研究方面的最新成果，才使本书具有了重要的战略规划和工程应用价值；副主任舒印彪直接领导了本书的撰写工作，并听取汇报审定书稿。本书撰写组组长张启平、副组长张正陵、韩丰、蒋莉萍和张克负责组织书稿的研究撰写工作；张启平负责“第一章 概述”的撰写并对全书进行了多次修改；撰写组高艺负责北美电网和印度电网的研究撰写，孟繁骏负责欧洲和俄罗斯电网的研究撰写，刘栋负责日本和巴西电网的研究撰写，罗金山、汪莹和薛雅玮分别负责中国、澳大利亚、非洲电网的研究撰写，孔维政和谢国辉负责对各个电网新能源和智能电网新技术的研究撰写，曹镇负责相关章节的整理并对类似书籍的信息进行了详细的查询，张启平、韩丰、李隽、宋福龙和李琼慧对全书进行统稿。

在书稿撰写讨论过程中，李明节、李晨光提出了宝贵的意见和建议；国家电网公司发展部、调控中心、国网北京经济技术研究院、国网能源研究院、

英大传媒集团等部门和单位给予了大力支持，在此深表谢意！由于有些电网史料难以找到，以及撰写者水平有限，书中难免有缺点和不足，望读者批评指正。

撰写组

2017年3月



目 录

前言

第一章 概述	1
第二章 北美联合电网	16
第一节 电网现状	16
第二节 电网发展历程	44
第三节 电网发展趋势	76
第三章 欧洲电网	93
第一节 电网现状	93
第二节 电网发展历程	117
第三节 电网发展趋势	137
第四章 俄罗斯电网	153
第一节 电网现状	153
第二节 电网发展历程	163
第三节 电网发展趋势	189
第五章 日本电网	193
第一节 电网现状	193
第二节 电网发展历程	201
第三节 电网发展趋势	211
第六章 巴西电网	225
第一节 电网现状	225

第二节 电网发展历程	237
第三节 电网发展趋势	245
第七章 印度电网	248
第一节 电网现状	248
第二节 电网发展历程	257
第三节 电网发展趋势	264
第八章 澳大利亚电网	271
第一节 电网现状	271
第二节 电网发展历程	282
第三节 电网发展趋势	289
第九章 非洲电网	298
第一节 电网现状	298
第二节 电网发展历程	320
第三节 电网发展趋势	326
第十章 中国电网	331
第一节 电网现状	331
第二节 电网发展历程	365
第三节 电力技术发展趋势	378
第四节 电网发展趋势	384
参考文献	395
索引	401



概 述

电力技术的发展是人类科技发展史上最重要的成就之一。自然界中存在的所有能源都可以通过发电技术（装备）转化为电力，再通过输电技术和用电技术（设备）加以利用。电力是以电磁波的形式在输电线路中传输，其传播速度与光速相同，达到 30 万千米/秒。因此，电力生产、传输和使用是瞬间完成的，这是电力系统有别于其他工业系统的一个显著特点。

电力技术的发展以直流电“起锚”而以交流电“远航”。著名发明家托马斯·爱迪生于 1879 年用直流电“电”亮了世界上第一盏照明灯具。此项技术的发明引起了华尔街投资银行家约翰·皮尔庞特·摩根的极大兴趣，他在爱迪生的实验室观看了电灯通电试验后，请爱迪生在自己的家里安装了一套直流发电系统用于替代煤气灯具照明并获得成功。在摩根的积极支持下，爱迪生的直流电力照明技术在纽约得到了推广应用。1882 年爱迪生在曼哈顿珍珠街建设了世界上第一座发电站，应用 110 伏直流电给 4000 个灯泡供电。但不久人们就发现，因为直流输电电压太低，使输电距离受到很大限制，不得不建设多个相互独立的供电系统以满足供电需求。这不仅占用了城市中心宝贵的空间资源，而且还带来了无法忍受的环境污染问题。

另一位天才发明家尼古拉·特斯拉（当时他是爱迪生的助手）敏锐地注意到了直流电力技术当时存在的问题，很快研究发明了交流电。但遭到爱迪生的强烈反对，其认为交流电的电压太高危及人身安全，甚至给大型动物和死囚施加交流电，来证明交流电的危害性。然而，西屋公司的创始人威斯汀·豪斯独具慧眼，购买尼古拉·特斯拉的专利并聘用了特斯拉大力发展交流电力技术。经过 10 余年的争论，



人们逐渐认识了交流电的特性，特别是在 1893 年芝加哥世界博览会上西屋公司用交流电“电”亮万盏灯具后，交流电具有的高电压、远距离输电的特点和成本低、损耗小的优势广为人们所接受。约翰·皮尔庞特·摩根洞察到交流电广阔的应用前景，通过资本运作的方式将爱迪生电气公司进行了重组并改名为通用电气公司^①，破除了影响交流电发展的阻力，与西屋公司在竞争中共同推动交流电力技术进入快速发展的“康庄大道”。

电网作为电力传输和配送的载体是随着交流电力技术的发展而发展的。早在 19 世纪末电网发展初期，人们首先是利用交流输电技术电压升降灵活的特点来解决远离城市供电区的水（火）电站电力输送问题。当时最为典型的工程是 1896 年建成投产的美国尼亚加拉水电站，装机容量达 7 万千瓦，除了向电站附近的部分用户供电外，通过 2000/20000 伏升压变压器和三相交流线路将 2.2 万千瓦的电力输送到 40 千米外的纽约州水牛城降压后再向 2000 伏和 110 伏电力用户供电。随着城市和工业的高速发展，单一的交流输电系统不能满足快速增长的电力需求及其可靠供电的要求。于是，围绕着城市用电负荷中心开始构建电网，各类电站通过接入电网向用户供电。早在 20 世纪 20 年代的英国，围绕伦敦供电区建成 132 千伏高压电网，远在英格兰中部的坑口电站通过 132 千伏交流线路接入伦敦电网，不仅提高了伦敦地区用户的供电可靠性，还使电价在 10 年内下降了 2/3。

从 1893 年芝加哥世博会确立交流输电技术的主导地位至 1923 年的 30 年时间内，交流电的电压等级从 110 伏提升至 230 千伏，供电方式也从发电厂向用户直接馈供，转变为发电厂升压接入电网再由电网降压向各类用户供电。到 20 世纪 30 年代，在北美和西欧等国家，不仅以城市为中心的电网规模越来越大，而且在相邻地区之间已经开始实施联网。美国宾夕法尼亚州与新泽西州于 1927 年开始联网运行，是世界上第一个跨州电网。电网规模的扩大为发展大容量、高效率的发电机组创造了条件，美国分别于 1929 年和 1934 年投产了 20 万千瓦的汽轮发电机组和 10.8 万千瓦的水轮发电机组，这使得大电网的规模经济性进一步显现。在西欧地区由于每个国家国土面积都不大，各国在发展城市电网的同时，加强城市电网之间的互联，主网架电压等级也由 20 年代的 132 千伏逐渐上升为 220 千伏。

① 资料来源：根据《美国商业大亨传奇》视频资料整理。

第二次世界大战结束后,随着欧洲、北美和亚太地区经济的恢复性增长,用电需求大幅增加,使电网发展进程加快。为了节约投资、分享大电网效益,美国和加拿大于1962年首先在东部地区形成了包括纽约、新英格兰、宾州、新泽西、马里兰、密歇根和加拿大安大略的东部同步电网,主网架电压等级为345千伏和230千伏。1967年,在西部地区也形成了包括亚利桑那、新墨西哥、内华达、加利福尼亚等州的西部同步电网,主网架最高电压等级为500千伏。加拿大于1965年建成世界首条735千伏线路,用于魁北克北部马尼夸根河上大型水电基地向蒙特利尔等城市负荷中心输电;美国也于1969年建成第一条765千伏交流线路,主要用于大型发电厂送出工程。关于特高压输电技术,美国电力公司和邦那维尔(BPA)电力公司于1967年开始进行1000千伏交流输电的技术经济性研究,但由于电力需求逐步趋缓,此项技术没有得到工程应用。1970年建成 ± 400 千伏太平洋直流输电工程(1987年升压为 ± 500 千伏),输电容量140万千瓦。1987年又建成投运从犹他州至加利福尼亚州南部的 ± 500 千伏直流输电工程,输送容量为190万千瓦,线路长度780千米。截止到20世纪80年代末,在北美地区已经形成以洛基山为界的东部同步电网、西部同步电网以及德克萨斯州电网(简称德州电网)和魁北克电网4个同步电网。其中东部和西部同步电网分别包括了美国、加拿大、墨西哥的39个州(省)和17个州(省),供电区域分别为520万和380万 km^2 。各个同步电网主网架电压等级也从50年代初期的345千伏提升至500千伏。随着同步电网规模的增加,联网的经济效益也进一步显现,除了节约大量的电源投资外,加拿大与美国电力公司从水火互补、丰枯互济运行方面节约的燃料成本就达35亿美元,通过经济调度获得的收益达150亿美元(1986年)。电网规模的增加也进一步促进了大容量、高效率汽轮发电机技术的发展,到80年代末已有多台单机容量为100万千瓦及以上的火电和核电机组投入运行。

从20世纪80年代末至今,北美电网格局基本没有变化,只是在四个同步电网之间加强了直联联网,如图2.1-21所示,在东部与西部电网之间有6个直流(背靠背)输电工程,在东部与德州电网之间有2回高压直流相联,东部与魁北克电网之间除5回“点对网”交流线路外还有1回直流(背靠背)互联。截止到2012年四个同步电网规模如表2.1-8所示。

二战后的欧洲经济呈恢复性高速增长,极大促进电力工业的发展。从20世纪



50年代初开始,瑞典、法国和德国等国先后建成投运 400 千伏(380 千伏)交流输电工程用于大型电源基地的外送、主网架升级和相邻国家之间的电网互联。1964 年,联接法德、法西(班牙)电网的 400 千伏跨国联络线建成投运;1961 年,法国与英国通过 ± 100 千伏 16 万千瓦直流工程实现异步联网(1985 年改造为 ± 270 千伏 200 万千瓦直流输电工程)。至 20 世纪 80 年代末,西欧大陆同步电网已覆盖 12 个国家。1993 年中欧电网(波兰、捷克、斯洛伐克、匈牙利)断开了与原苏联统一电力系统的联络线,通过新建的 9 回 400 千伏交流线路与西欧大陆同步电网联网运行。北非的摩洛哥和跨越欧亚的土耳其分别于 1997 年和 2010 年与欧洲大陆同步电网联网运行。欧洲电网从 20 世纪 50 年代始发展至今,已经实现了除塞浦路斯和冰岛之外的所有 32 个国家电网之间的互联,形成了 5 个同步电网,如图 3.1-9 所示,装机容量达 10 亿千瓦,用电量为 3.27 万亿千瓦时。其中,欧洲大陆同步电网装机 8 亿千瓦,用电量 2.5 万亿千瓦时,如表 3.1-6 所示。其供电范围覆盖 24 个国家、345 万 km^2 。各同步电网之间通过直流工程互联,其中,欧洲大陆同步电网与北欧同步电网之间通过 11 回直流相联,与波罗的海同步电网之间通过 4 回直流工程相联,与英国电网通过 2 回直流相联;英国与爱尔兰电网之间通过 2 回直流相联。

苏联电力技术的起步虽然略晚于欧美国家,但电气化进程不断加快,1933 年输电电压等级也达到 220 千伏,10 万千瓦以上的发电厂达到 11 座,总装机容量达到 371 万千瓦。在第二次世界大战之前,苏联围绕着莫斯科、基辅、巴库、列宁格勒等重点城市建立了若干地区性电网。二战结束后,苏联工业发展迅猛,用电需求大幅增加。苏联提出电力建设超前工业发展的原则,持续加大电力开发建设的力度,由于大型水电和坑口电站远离莫斯科等负荷中心地区,开发远距离大容量输电技术和加强跨地区联网进程加快。1956 年,从古比雪夫水电厂至莫斯科全长 900 千米的 500 千伏双回输电线路建成投运;同年,中部地区电网与伏尔加地区电网联网运行,1959 年,伏尔加与乌拉尔地区电网实现交流同步联网。到 1972 年,乌拉尔以西的 8 个地区电网实现交流同步联网。到 80 年代初,苏联形成了包括 9 个地区电网在内(含西伯利亚)的同步电网,区域面积达 1440 万 km^2 ,主网架电压等级为 500 千伏。在此期间,多项 750 千伏输电工程也建成投运,主要用于电源汇集与外送。随着同步电网规模的扩大和主网架的加强,发电机组单机容量也在不断提高,火电、水电和核电单机容量分别达到 120 万、65 万千瓦和 100 万千瓦。1980 年后,乌拉尔

以西地区的电源开发殆尽，电源开发的重心向西伯利亚及以东地区转移，对电网输电能力提出了新的要求。在加强东电西送联网输电通道的建设基础上，于1985年建成投运了从哈萨克斯坦境内埃基巴斯图兹到库斯坦奈全长889千米的1150千伏特高压线路，此后又建成投运库斯坦奈到俄罗斯境内的东里雅宾斯克（321千米）和埃基巴斯图兹到西伯利亚东部的伊塔特（1154千米）特高压线路（降压至500千伏运行）；在80年代还建成投运苏联与中欧5国（波兰、保加利亚、罗马尼亚、匈牙利、捷克斯洛伐克）750千伏的联网工程。至此，苏联与东欧同步电网覆盖的区域面积达到1530万 km^2 ，装机容量4.6亿千瓦。

20世纪90年代至今，随着苏联解体，哈萨克斯坦、外高加索、乌克兰以及中欧部分国家电网断开了与原苏联同步电网（统一电力系统）的联系，在俄罗斯境内的6个地区电网构成俄罗斯同步电网，如图4.1-7所示。其覆盖的区域面积为1480万 km^2 ，2011年装机容量为2.34亿千瓦，发电量1万亿千瓦时，其中气电占50%，煤电仅占16%。

日本也是较早有电的国家之一，早在1899年广岛水力电气公司已投运长达25千米的交流输电工程。1915年，通过115千伏交流输电系统将猪苗代水电厂3.8万千瓦的电力输送到228千米外的东京。在第二次世界大战爆发前已形成多个以110千伏或154千伏为主网架的独立运行的电网。1945年以后随着战后经济的复苏，用电需求持续大幅增长，促进电力工业快速发展。到60年代中期，东京电网主网架升级为275千伏，与东北地区电网通过275千伏交流线路联网形成东部交流电网（50赫）；在西部地区形成了包括关西、中部、九州、北陆、中国、四国六个地区电网在内的西部同步电网（60赫），主网架电压等级为275千伏和187千伏。电源结构也由战前的“水主火辅”转变为“火主水辅”，发电量跃居世界第三位。为了满足快速增长的用电需求，日本政府从1960年开始持续加大电力投资力度，截止到20世纪80年代末，东部和西部同步电网主网架电压等级升为500千伏，安全可靠性和大幅提升，在东、西部同步电网之间通过直流背靠背工程实现异步联网，北海道电网通过 ± 250 千伏直流工程与东部电网联网运行。在加强电网建设的同时，大容量高效率火电和核电装机也得到长足的发展，1977年火电机组平均供电煤耗降到了336克/千瓦时，成为当时煤耗最低的国家之一。1990年核电装机容量占总装机容量比例达到22.9%。在输电技术方面，采用大截面（TACSR 810 $\text{mm}^2 \times 4$ ）钢芯耐热铝合金导线，用于沿海大型电源基地向负荷

中心主网架送电，输电的热稳极限提升至 300 万千瓦；在 20 世纪 90 年代日本建设了新榛名 1000 千伏交流试验变电站和新泻—群马—山梨 248 千米的特高压输电线路（降压至 500 千伏运行）。由于后来用电趋缓，特高压工程没有继续发展。从 20 世纪 90 年代始至今，日本电网进入发展完善阶段，进一步加强了跨区联网以提升电力交换能力，如图 5.1-9 所示。2012 年，日本电网装机容量 2.93 亿千瓦，用电量为 0.92 万亿千瓦时。

巴西因其水能资源非常丰富，电力工业的发展是从水电站建设开始。早在 1883 年巴西建成投运首座水电站——里贝朗因费诺水电站并通过 2 千米长的直流线路向新利马矿区供电。巴西电网的发展也是由水电站的开发建设驱动的。在 20 世纪 60 年代，巴西开始大规模开发巴拉那、托坎廷斯河等流域的大型水电基地。为满足电力远距离外送和消纳，超高压输电技术和电网发展提速。在 60~70 年代，主要采用 345 千伏输电技术用于中西部地区大型水电厂电力外送和加强电网主网架，形成了北部、东北部、东南部和南部四个同步电网。从 80 年代开始，图库鲁伊（装机容量 837 万千瓦）和伊泰普（1260 万千瓦）等大型水电站陆续建成投运，先后采用 500、765 千伏交流和 ± 600 千伏直流输电技术建设电力外送通道，与此同时采用 500 千伏交流输电技术加强跨区联网建设。作为巴西第二大水电站的图库鲁伊水电站采用 5 回 500 千伏线路作为外送通道接入北部电网，北部电网通过 500 千伏联络线与东北部电网互联形成一个同步电网；伊泰普水电站通过 3 回 765 千伏交流线路和 2 个 ± 600 千伏直流工程（630 万千瓦）接入东南部电网；南部电网通过 765/500 千伏联络变压器与东南部电网相联同步运行；1999 年在北部与南部两个同步电网之间建成投运 1 回长达 1028 千米的 500 千伏交流线路（加串补），实现全国交流联网，如图 6.2-2 所示。2000 年后，巴西与阿根廷通过双回 500 千伏线路和直流背靠背工程实现了两国联网，交换容量达 200 万千瓦；与乌拉圭和委内瑞拉等周边国家通过直流背靠背的方式联网运行，但交换容量比较小。

印度在 1947 年 8 月独立时全国装机只有 136 万千瓦，基本上没有形成电网供电。到 20 世纪 60 年代初期，全国装机达到 465 万千瓦，地区电网电压等级为 132 千伏，电网规模不大。从 60 年代中期开始电网发展加快，主网架电压等级也由 132 千伏逐步升为 220 千伏并实施了跨邦联网，形成 5 个规模不同的区域电网，网架比较薄弱。1977 年投运 400 千伏输电工程，旨在提升区域电网输电能力、加强主网架建

设、提高安全水平。从 1997 年开始实施跨区域联网,到 2007 年实现了北部、西部、东部及东北部四个区域电网的同步互联,主网架电压等级为 400/220 千伏,多为电磁环网运行。2013 年南部电网通过 765 千伏交流输电工程与主网同步互联,从而实现全国电网同步互联运行,如图 7.1-4 所示。2012 年装机容量达到 2 亿千瓦,其中煤电占比为 58.5%,如表 7.1-1 所示。

澳大利亚电力工业起步于 19 世纪末。1916 年在塔斯马尼亚州建设了沃德马纳水电站并通过 88 千伏输电线路将 0.68 万千瓦电力送到 100 千米外的州府霍巴特。1924 年在维多利亚州建设装机容量为 5 万千瓦的雅洛恩电站并通过 60 千米长的 132 千伏输电线路输电到首府墨尔本。此后的 20 年,澳大利亚的电力工业主要在维多利亚、新南威尔士两州发展,电网规模不大。第二次世界大战后,随着经济恢复性增长,推动电力工业进入快速发展期。1949 年位于新南威尔士州科修斯科国家公园内的雪山水电工程开工建设,该工程总装机容量 374 万千瓦,1959 年后发电机组陆续投产发电,作为电站送出工程之一的第一条 330 千伏线路于 1959 年投入运行,将电力送往两州东部沿海城市(负荷中心)消纳。20 世纪 60~70 年代,在加快电力开发的同时,进一步加强东部三州(维多利亚州、新南威尔士州和昆士兰州)电网建设。1974 年雪山水电工程 374 万千瓦机组全部建成投产。到 1980 年新南威尔士州发电装机达到 780 万千瓦,330/132 千伏主网架基本建成,并实现了与维多利亚州同步联网送电。维多利亚州电力装机也达到 521 万千瓦,1977 年建成投运第一条 500 千伏线路,主网架由 500/330/220 千伏三个电压等级构成。昆士兰州电力装机达到 304 万千瓦,煤电机组容量为 270 万千瓦,主网架电压等级由 275/132 千伏构成。西澳地区电力也得到了相应的发展,全国绝大部分人口都用上了电。1980 年以来,为满足持续增长的用电需求,澳大利亚加大火电开发建设力度,2014 年澳大利亚总装机容量达到 6500 万千瓦,其中煤电占比为 41.7%,气电占比 30.5%,煤电发电量占比达到 64%。与此同时,进一步加强跨州联网建设,1996 年南澳州通过一条 275 千伏线路与维多利亚州同步联网,维多利亚州与新南威尔士电网联网进一步加强,三州电力交换总容量达到 1900 万千瓦;2001 年昆士兰州通过双回 275 千伏线路与新南威尔士州同步联网;2005 年塔斯马尼亚通过 ± 400 千伏直流(50 万千瓦)海缆与维多利亚州实现异步联网。至此,澳大利亚东南部五州实现了电网互联运行,如图 8.1-3 所示。

非洲拥有 11 亿人口,电力装机仅 1.4 亿千瓦,人均 127 千瓦。大部分国家基础设施



十分薄弱，目前仍然有 55% 的人口没有用上电，电力工业的发展极不平衡。撒哈拉以南地区很多国家电力工业才刚刚起步，而南非等少数几个国家电力工业已经实现现代化。

早在 1881 年，南非开普敦就出现了电灯，到 1900 年，在约翰内斯堡、开普敦、德班、比勒陀利亚等主要城市建成了小型供电系统。第二次世界大战后，随着全球经济恢复性增长，南非和北非地中海沿岸的国家电力工业发展开始提速。南非电力委员会（国家电力公司前身）在 1948 年收购了维多利亚瀑布电力公司后，确立了电力发展的主导地位，负责南非电力发展，结合南非煤炭资源比较富集的特点，重点进行大型煤电基地开发和电网建设。进入 20 世纪 70 年代后用电需求持续大幅增长，推动电力加快发展。1979 年建成投运非洲首条 ± 533 千伏直流输电工程，从莫桑比克至约翰内斯堡，全长 1420 千米，额定容量 192 万千瓦；1987 年建成投运非洲首条 765 千伏交流输电工程，将交流电网的电压等级提升至 765 千伏；到 1990 年，南非装机容量达到 4100 万千瓦，其中煤电 3300 万千瓦，连接各大城市的 400 千伏主网架基本建成，南非政府于 1994 年开始实施发电市场化改革，禁止国有资本投资发电市场，希望引导私有资本进入发电市场。但由于上网电价缺乏竞争力，电力发展速度减缓，引起了新一轮电力危机。2004 年因缺电问题突出，政府恢复国有资本投资发电市场的政策。从 1990 年至今，发电装机仅增加了 356 万千瓦，经历了两次因缺电导致的大面积拉闸限电。截止到 2012 年，南非电力装机容量为 4456 万千瓦，其中煤电装机占比为 90%，如图 9.1-15 所示，已实现全国联网并与莫桑比克等周边国家进行跨国输电，如图 9.1-14 所示。

除南非电力发展较快以外，北非地中海沿岸埃及、阿尔及利亚、突尼斯、摩洛哥、利比亚五国电力发展也比较好。目前已形成沿地中海南岸跨国联网格局，并通过双回 400 千伏线路穿越直布罗陀海峡与西班牙电网同步互联，五国电力装机容量 6081 万千瓦，占非洲电力装机 43%。

我国是有电较早的国家之一。上海开埠使中国有电的历史几乎与世界同步。从 1882 年 7 月 26 日在上海外滩至虹口的电杆上点亮 15 盏电灯，到 1949 年新中国成立前夕，全国装机容量只有 185 万千瓦，发电量 43 亿千瓦时，分别位居世界第 21 位和 25 位。在东北和华北形成了几个供电范围比较大的电力系统。第一个是以丰满水电厂为送端的东北中部电力系统，采用 154 千伏线路连接沈阳、抚顺、长春、吉林和哈尔滨等城市，形成了我国第一个跨省输电系统；第二个是以水丰水电厂为送端的南部电力系统，采用 220 千伏和 154 千伏线路连接大连、鞍山、丹东、营口等



城市，154 千伏系统与 220 千伏系统在鞍山一次变压器低压侧（44 千伏）联网，形成了以 154 千伏为主网架的辽宁电网；第三个是以镜泊湖水电厂为送端的东部电力系统，采用 110 千伏线路连接鸡西、牡丹江、延边地区；第四个是连接北京、天津、唐山等城市和发电厂的冀北电力系统，线路电压等级为 77 千伏。在上海、南京、武汉、广州等大城市初步形成了城市配电系统。

1949 年新中国成立后，电力发展进入了“快车道”，将一批大型火电项目列入苏联援建的 156 项重点工程中。到 50 年代末，新增装机容量达 164 万千瓦，其中单机容量达到 10 万千瓦（1958 年在吉林热电厂投产）。为了满足快速增加的电力需求，在 60~70 年代，国家加大水电资源开发建设力度，先后建成投产一批大中型水电厂，对推动电网发展发挥了重要作用。在东北吉林省，对始建于 1937 年的丰满水力发电厂进行续建，于 1960 年建成投产全部 8 台机组共 55 万千瓦装机容量；我国自行设计、制造的首个 220 千伏输电工程（从丰满电厂到辽宁抚顺全长 369 千米）于 1954 年 1 月建成投产，使东北电网主网架电压等级提升至 220 千伏。1960 年 4 月，我国自行设计、自制设备、自主施工的浙江新安江水力发电厂开始发电；同年 9 月，以新安江电厂为送端，连接杭州与上海的 220 千伏跨省输电线路建成投运，标志着华东电网建设的开始。1965 年 12 月，新安江电厂 9 台机组共 66.5 万千瓦装机全部建成投产。70 年代初期，连接杭州、上海和常州的 220 千伏长三角大环网建成投运，形成了华东电网 220 千伏主网架。1958 年 9 月，位于湖北汉江中游的丹江口水力发电厂开工建设并于 1968 年 10 月第一台机组投产发电，1973 年 6 月共 6 台机组 90 万千瓦装机全部建成投产，通过 220 千伏线路分别向武汉和南阳、平顶山送电；1979 年 5 月 20 日，鄂豫两省电网通过丹江口电厂 220 千伏母联开关实现联网运行；为了共享大电网的安全经济效益，江西、湖南两省网于 1983 年 1 月和 1984 年 1 月与主网联网运行，从此形成了华中电网的基本格局。位于黄河上游甘肃省永靖县的刘家峡水电厂于 1958 年 9 月开工建设，于 1969 年 3 月第一台机组投产，1975 年 2 月共 5 台机组、123 万千瓦装机容量全部建成投产；为满足电力外送要求，于 1972 年建成投运以刘家峡水电厂为送端、连接甘肃（天水）与陕西（关中）的 330 千伏输电线路，标志着西北电网建设的开始。

华北电网形成是由京津唐电网开始的。1954 年 11 月，北京南苑至天津白庙的 110 千伏线路投产，1955 年，北京（东北郊）至张家口（官厅）110 千伏线路投产，