



“十三五”普通高等教育规划教材
新能源科学与工程系列教材

新能源发电与 控制技术

付蓉 马海啸 主编



配套课件



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育规划教材
新能源科学与工程系列教材

TM01
28

新能源发电与 控制技术

主编 付 蓉 马海啸
编写 王 瑾 汤 奕
主审 李 扬



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育规划教材。

全书共9章,介绍了新能源发电及其并网控制的基本知识,将新能源发电技术、电力电子技术和控制技术有机结合在一起,围绕目前国际社会综合利用新能源的研究热点,重点分析了光伏发电与控制技术、风能发电与控制技术、海洋能发电与控制技术、生物质能发电与控制技术、地热能发电技术和储能技术等内容。

本书可作为电气工程及其自动化专业、自动化专业及其相关专业的本科生教材,适用于专业卓越工程师人才培养教学用书,对相关专业的研究生和工程技术人员也是一本较为系统完整的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

新能源发电与控制技术/付蓉,马海啸主编. —北京:中国电力出版社,2015.10

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5123-7931-2

I. ①新… II. ①付…②马… III. ①新能源—发电—高等学校—教材 IV. ①TM61

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第141159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)

北京雁林吉兆印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年10月第一版 2015年10月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 18.75印张 455千字

定价 38.00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

前 言

能源、环境是当今人类生存和发展所要解决的紧迫问题。随着煤炭、石油、天然气等常规能源面临不可再生的消耗和生态环境保护的需要，新能源的开发和电力存储技术的发展迫在眉睫，发展新能源发电技术具有极其重要的社会意义和经济价值。

新能源发电技术是一个涉及电气、动力、材料、控制、电子、信息等多个学科的交叉高新技术，也是当前电气工程重要的研究领域和发展方向。为了推动新能源发电技术的发展，目前亟待将最新的科技知识与教学成果组织到教材内容，体现专业特色，培养跟上时代发展要求的相关人才。

本教材主要介绍了新能源发电及其并网控制技术，特色是将新能源发电技术、电力电子技术和控制技术有机结合，从系统的角度加以分析阐述，主要内容包括光伏发电、风力发电、生物质能发电、海洋能发电等，并讲述了现阶段比较常用的储能技术。

第1章是新能源发电与控制技术导论，分析了国内外新能源发展状况的技术和经济数据。第2、3章分析了光伏发电与控制技术，主要介绍太阳能的一些基本应用及其实例，并对光伏发电及其并网技术进行了系统的介绍。第4、5章关于风力发电与控制技术，重点介绍风力发电机组及其工作原理，风力发电机组的控制策略和并网技术，并对风力发电并网进行了仿真分析。第6~8章分析了其他新能源发电与控制技术，主要对生物质能发电技术、海洋能发电技术和地热能发电技术的发展、结构组成和技术特点进行了详细介绍。第9章介绍储能技术，主要对飞轮储能、超导磁储能、超级电容器储能、蓄电池储能、冰蓄冷储能的发展、应用及其前景进行了详细介绍。

本书由付蓉和马海啸主编，东南大学李扬主审。第1、4、5章由付蓉编写，第2、3章由马海啸编写，第6、7、8章由王瑾编写，第9章由汤奕编写，全书由付蓉统稿。在本书的编写过程中，硕士研究生孙万钱、叶海云、窦友婷和周振凯等帮助完成了书中的部分算例、书稿的录入工作，在此谨对他们表示衷心的感谢。

由于编者的理论水平和实践经验有限，书中难免有不当或错误之处，恳请读者批评指正。

编者
2015年3月

目 录

前言	
第 1 章 新能源发电与控制技术导论	1
1.1 能源结构与能源储备	1
1.2 能源的分类与新能源特点	5
1.3 新能源发电技术	6
1.4 发展新能源的意义	10
思考题与习题	11
第 2 章 光伏发电及其最大功率点跟踪技术	12
2.1 太阳的辐射及太阳能利用	12
2.2 光伏电池基础知识	21
2.3 光伏电池发电原理	39
2.4 最大功率点跟踪技术	45
2.5 基于采样数据的直接 MPPT 控制法	55
2.6 MPPT 控制方法的实际应用	86
2.7 基于物理跟踪的光伏发电系统 MPPT	100
思考题与习题	104
第 3 章 光伏蓄电池与光伏控制器	106
3.1 光伏蓄电池概述	106
3.2 铅酸蓄电池的结构和工作原理	108
3.3 VRLA 蓄电池的充、放电特性	118
3.4 光伏控制器	132
3.5 光伏并网逆变器	144
思考题与习题	150
第 4 章 风力发电技术	151
4.1 风的特性	151
4.2 风力发电机组	154
4.3 风力机的基本理论	156
4.4 风力发电机及工作原理	162
思考题与习题	171
第 5 章 风力发电机组的控制技术	172
5.1 风力机的控制技术	172
5.2 独立运行式风力发电机组的控制系统	176
5.3 风力发电机组的并网控制策略	178
5.4 风力发电并网系统分析	193

5.5	风力发电系统仿真分析	200
5.6	风力发电并网对电网的影响分析	205
	思考题与习题	207
第 6 章	生物质能发电与控制	208
6.1	概述	208
6.2	生物质燃烧发电与控制技术	211
6.3	生物质气化发电技术	216
6.4	生物质生物转化发电技术	221
6.5	生物质发电并网技术及对电网的影响	228
	思考题与习题	230
第 7 章	海洋能发电与控制	231
7.1	概述	231
7.2	海洋能发电技术	235
7.3	海洋能发电的未来展望	253
	思考题与习题	255
第 8 章	地热能发电与应用技术	256
8.1	概述	256
8.2	地热发电的方式	259
8.3	地热能利用的制约因素和环境保护	263
	思考题与习题	265
第 9 章	储能技术	266
9.1	飞轮储能	266
9.2	超导磁储能	270
9.3	超级电容器储能	274
9.4	电动汽车	278
9.5	抽水储能	280
9.6	压缩空气储能	281
9.7	氢储能	282
9.8	虚拟储能技术	284
	思考题与习题	287
	参考文献	288

第 1 章 新能源发电与控制技术导论

1.1 能源结构与能源储备

1.1.1 我国能源结构现状

随着经济的快速发展和人民生活水平的不断提高,我国能源消费总量也迅速增加,主要表现在两方面:首先,我国年人均能源消费量逐年增加,导致一次能源消费总量的快速增加;其次,石油、天然气等在所有一次能源消费中所占比重将越来越大。预计到 2040 年,我国一次能源人均消费量约将达到 2.71t 标准煤,人均能源消费量相当于目前世界人均能源消费量的平均值,远低于发达国家目前的平均水平。由于我国人均常规能源资源的相对不足,尤其是石油和天然气等一次能源的对外依赖性过大,以及电力供应的全年性缺乏,已经成为我国经济、社会可持续发展的一个限制性因素。如果无法妥善解决这些问题,我国将面临着相当严峻的能源形势。

煤炭是我国最主要的能源形式,近几年来我国煤炭生产和消费都有了明显的上升,2010 年我国煤炭生产量占全国能源生产总量的 81.3%,煤炭消费量占全国能源消费总量的 71.9%。可见,无论生产与消费,煤炭都是我国最主要的能源形式。与全球其他国家相比,我国煤炭的生产量也占绝对优势,近几年来,我国煤炭生产量约占全球煤炭生产总量的一半左右,产量明显高于其他国家。然而,我国煤炭的储量并非全球第一。如表 1-1 所示,2013 年底,我国煤炭储量为 1145 亿 t,占全球煤炭储量的 12.8%,仅排在全球煤炭储量的第三位;同期美国的煤炭储量为 2372.95 亿 t,占全球煤炭储量的 26.6%,排在全球煤炭储量的第一位;同期,俄罗斯的煤炭储量为 1570.1 亿 t,占全球煤炭储量的 17.6%,排在全球煤炭储量的第二位。与我国煤炭的生产量全球第一及储量全球第三的地位形成鲜明对比的是我国煤炭的储采比,2013 年底我国煤炭的储采比只有 31,这意味着以目前产量计算,我国的已探明煤炭储量只能持续生产 31 年;而同期美国的储采比为 266,俄罗斯的储采比为 452,并且储采比超过我国的国家共有 27 个。综上所述,虽然我国煤炭的产量目前居世界第一,储量居世界第三,但是我国煤炭产业存在严重的过度开采,相对于发达国家,我国煤炭产业不具备可持续发展的能力。因此,我国未来必须寻找适当的能源形式来代替煤炭作为我国第一能源的地位和作用,以保证我国能源经济的可持续发展。

表 1-1 2013 年我国与全球主要煤炭储量国比较

国家	煤炭总储量 (百万 t)	占全球煤炭储量的比重 (%)	储采比
美国	237 295	26.6	266
俄罗斯	157 010	17.6	452
中国	114 500	12.8	31

2010年,我国石油产量占全国能源生产总量10.4%,石油消费量占全国能源消费总量的20.0%。虽然石油产量和消费量都远远低于煤炭,但石油仍然是我国第二大能源形式,对于我国经济发展是至关重要的。由表1-2可知,从储量上看,我国石油储量远远低于我国煤炭的储量。2013年底,我国石油储量为181亿桶,仅占全球石油总储量的1.1%,石油储量非常缺乏。而同期石油储量较大的委内瑞拉、沙特阿拉伯和加拿大石油储量分别为2983亿桶、2659亿桶和1743亿桶,远远高于我国的石油储量,2013年底石油储量高于我国的国家共13个。从目前的情况看,全球石油资源主要分布在中东(沙特阿拉伯、伊朗、伊拉克、科威特和阿联酋)和美洲(委内瑞拉和加拿大),亚洲石油储量最为贫乏。从石油生产方面看,2013年我国石油产量占全球石油总产量的5%,位于沙特阿拉伯、俄罗斯和美国之后,居全球第四位。另外,2013年底我国石油储采比为11.9,居世界第33位。可见,在我国石油储量相对贫乏的情况下,我国的石油生产量是很大的,在我国石油过度开发的情况下,我国石油未来的开发潜力极其有限,未来面临石油资源枯竭的可能性。最后,从我国能源已探明储量的发展情况看,1992、2002年和2013年我国石油探明剩余储量分别为152亿桶、155亿桶和181亿桶,这说明和其他多数国家一样,随着经济发展和技术进步,我国在不断发现新的石油储量,这可以在一定程度上延长我国石油开采年限。然而,问题在于我国石油的总储量是不变的,除非未来发现新的、更多的石油储备,否则这种过度的石油生产方式,必将在短期内造成我国石油更大的消费缺口。

表 1-2 2013 年我国与全球主要石油储量国比较

国家	1992 年 (10 亿桶)	2002 年 (10 亿桶)	2013 年 (10 亿桶)	占全球石油 储量的比重 (%)	2013 年底储采比
中国	15.2	15.5	18.1	1.1	11.9
委内瑞拉	63.3	77.3	298.3	17.7	—
沙特阿拉伯	261.2	262.8	265.9	15.8	63.2
加拿大	39.6	180.4	174.3	10.3	—

天然气是我国第三大化石能源,但是储量同样贫乏。2013年底,我国天然气储量为33 000亿 m^3 ,占全球天然气总储量的1.8%,居全球第13位。由表1-3可知,从全球天然气储备情况来看,伊朗以338 000亿 m^3 的储量位居全球第一位,占全球天然气总储量的18.2%,俄罗斯和卡塔尔紧随其后,分别以313 000亿 m^3 和247 000亿 m^3 的储量位居全球第二位和第三位,分别占全球天然气总储量的16.8%和13.3%。可见,从储量上看,我国天然气目前的储量并没有任何优势。从天然气生产潜力方面看,2013年底我国天然气储采比为28.0,而同期伊朗、俄罗斯、卡塔尔等天然气高储量国家的储采比分别为大于100、51.7和大于100,可见我国天然气长期开采潜力较弱。从天然气探明剩余储量方面来看,2013年我国天然气已探明剩余储量比2002年提高了20 000亿 m^3 ,这说明虽然过去的10年间我国天然气开采量有所增长,但新探明的天然气储量明显超过了开发掉的天然气储量。而我国天然气开发还处于早期阶段,这说明如果未来不断探明新的天然气储量,则我国天然气的开采年限还会不断延长。

表 1-3

2013 年我国与全球主要天然气储量国比较

万亿 m³

国家	1992 年 (万亿 m ³)	2002 年 (万亿 m ³)	2013 年 (万亿 m ³)	占全球天然气 储量的比重 (%)	2013 年底储采比
中国	1.4	1.3	3.3	1.8	28.0
伊朗	20.7	26.7	33.8	18.2	>100
俄罗斯	—	29.8	31.3	16.8	51.7
卡塔尔	6.7	25.8	24.7	13.3	>100

1.1.2 我国的能源资源消费现状

能源是一个国家经济增长和社会发展的基础资源。我国改革开放以来,经济增长迅速,随着经济的快速增长,能源消费量也有了显著的增长。1980~2011年,我国能源消费增长5倍以上,已经由1980年的6.03亿t标准煤增长到2011年的34.80亿t标准煤,特别是2001年以来,我国能源消费量增长明显加速。从人均能源消费水平来看,虽然增速略慢于能源消费增长速度,但是30多年来人均能源消费也增加了4倍。一个国家的能源消费量受到该国能源供给量和环境保护两个方面的约束。

首先,从能源供给方面看,能源消费量取决于能源供给量。我国改革开放之初,经济发展相对缓慢,能源消费相对较少,1980年,我国能源生产总量为6.20亿t标准煤,同年能源消费量为5.86亿t标准煤,能源生产量略大于能源消费量。随着改革开放的逐渐深入和我国经济的快速发展,1992年,我国能源消费总量首次超能源生产总量,开启了我国能源市场供不应求的局面。之后的20年里,随着工业化的进一步发展和城镇化战略的实施,我国能源供求差距进一步拉大,到2013年,我国能源生产总量为34.0亿t标准煤,同年的能源消费总量则达到了37.50亿t标准煤。我国能源供给量虽然持续增长,但能源供给量的增长已经无法满足经济增长对于能源的需求,能源进口量持续增长,能源对外依存度逐年增长。

随着我国经济的快速增长,我国石油消费量增长十分迅速,虽然近些年来我国石油生产能力有了明显提升,但是仍然无法满足我国石油消费的需求。1980年,我国石油生产量为15 139.22万t标准煤,同期我国石油消费量为12 537.62万t标准煤,我国石油生产量超出消费量2601.61万t标准煤。1980~1994年,我国石油生产量一直大于消费量,石油供给充足。1985年我国石油产消差最大,为4728.25万t标准煤;1980~1985年我国石油产消差逐年拉大,1985~1994年我国石油产消差开始逐年减小,但这一期间我国石油生产量一直大于消费量。1995年以后,我国石油的产消差开始逆转,直到2010年,我国石油消费量一直保持大于生产量的状态,并且产消差距越来越大,石油生产量为29 002.58万t标准煤,石油消费量为61 647.54万t标准煤,石油消费量超出生产量32 644.96万t标准煤,石油消费缺口明显加大,石油消费量为生产量的2.13倍,严重超出生产能力。2013年,我国石油生产量为2.081亿t标准油,占全球石油生产总量的5.0%,2013年我国石油消费量为5.074亿t标准油,占当年全球石油消费总量的12.1%。可见,目前我国石油的生产能力已经无法满足我国石油的消费水平,因此,为了满足我国石油的正常消费,我国必须大量地进

口石油,目前我国石油进口量已经超过了我国自身生产量,这使得我国石油对外依存度变得越来越高,未来必然制约我国经济的持续发展。另外,2013年我国石油的储采比为11.9,远远低于沙特阿拉伯等石油储量丰富的国家(见表1-2)。因此,我国不但目前石油生产能力不足,未来生产潜力依然较小,为了使能源经济能够可持续发展,我国必须在短时间内找到解决这一问题的有效对策。

相对于石油来说,我国天然气的生产与消费的匹配度要高得多,我国绝大多数年份里,天然气完全可以自给自足。1980年,我国天然气生产量为1861.38万t标准煤,当年我国天然气消费量为1874.784万t标准煤,供需基本平衡;1980~1995年,我国天然气的生产和消费都基本保持平衡,产消差非常小;1995~2006年,我国天然气生产能力略超过消费水平,表现出一点点生产过剩的状况;2007~2010年,我国天然气消费量波动较大,且在2009年之后呈现出生产不足的情况。2013年,我国天然气产量为1.171亿t标准油,占全球天然气生产总量的3.5%,同年我国天然气消费量为1.616亿t标准油,占全球天然气消费总量的5.8%。可见,虽然一直以来我国天然气的生产量可以满足我国经济发展对天然气的消费需求,但是近两年我国的天然气市场已经开始出现生产能力不足的问题。2013年底,我国天然气的储采比为28.0,可以说明我国天然气未来具有一定的开发潜力,但持续时间有限。

其次,能源消费量增加必然对环境造成负面影响。随着我国能源消费量的不断增加,我国的二氧化碳排放量已于2003年超过欧盟并于2006年超过美国成为目前全球最大的二氧化碳排放国。1997~2010年,欧盟的二氧化碳排放量从42.99亿t减少到41.43亿t,美国的二氧化碳排放量略有增长,从60.81亿t增长到61.45亿t,增长1.05%,几乎可以忽略不计。然而,在同一期间,我国的二氧化碳排放量却从33.84亿t增长到83.33亿吨,增长146.25%,并成为全球最大的二氧化碳排放国,特别是在2002年以后,二氧化碳排放量增长速度明显加快,对环境已经造成极大影响。我国目前正处在工业化和城镇化的中期阶段,面临经济增长的压力,而经济增长必然增加我国能源消费量,从而造成能源消费量过大,消费增长速度过快,而这已经在一定程度上超出了我国的资源负载能力和环境承受能力。控制我国能源消费量增长速度,提高我国能源消费效率已经成为我国未来经济发展和解决环境保护问题的当务之急。

1.1.3 我国可持续发展战略

当前,全球气候变暖和能源供应安全已成为世界各国共同关注的重大战略问题,成为国际经济、社会、政治、外交、安全等领域的重要话题。随着我国经济的快速持续增长,能源资源环境也已成为影响未来发展的严重制约因素。在这一新形势下,大力开发利用可再生能源不仅是世界能源发展的必然趋势,也是我国能源战略和可持续发展战略的必然选择。在我国应对全球气候变化的国家行动方案中,以及实施节能减排的工作方案中,都已把加快可再生能源发展列为一项重大举措。前不久,我国公布了《可再生能源中长期发展规划》,确定到2020年可再生能源占到能源总消费量15%的目标。其中,水电装机容量要达到3亿kW(其中小水电7500万kW),风电总装机容量达到3000万kW,生物质能发电总装机容量达到3000万kW,沼气年利用量达到440亿 m^3 ,生物燃料乙醇和生物柴油年利用量达到1200万t,太阳能发电总容量要达到180万kW,太阳能热水器总集热面积达到3亿 m^2 ,再加上海洋能、地热能等,届时全国可再生能源利用量将相当于6亿t标准煤。这将有利于我国能

源结构的调整和保障能源供应安全,对减少温室气体排放、保护环境将发挥更加重要的作用。未来30~50年内,随着我国能源需求的增加和能源结构的调整优化,预计到2050年形成3亿~5亿kW的风力发电装机容量;预计到2020~2030年,小水电资源将基本开发完毕,形成1亿kW的装机水平;太阳能发电将在2020年之后得到大规模的发展,预计2050年将有10%的发电装机容量来自于太阳能发电,达到2亿~3亿kW;太阳能热水器散热面积可以达到15亿 m^2 保有量;生物质能源在能源供应中,特别是在农村能源和交通运输能源供应中将会占有重要地位。届时,可再生能源在能源消费总量中的比重将会达到30%或更高水平,为保障能源供应安全、减排温室气体和保护生态环境做出更大的贡献。

新能源技术及其产业将成为带动我国未来产业结构调整和经济结构调整的非常重要的新兴产业。中央和各级地方财政根据《可再生能源法》的要求,设立可再生能源发展专项资金。国家运用税收政策对可再生能源发展予以支持。增加国家财政对可再生能源领域的研发投入,鼓励科技创新,加强人才培养,支持产学研合作,开展可再生能源的科学研究、技术开发和产业化,完善保护知识产权的法制环境,全面提高可再生能源技术创新能力和服务水平。

1.2 能源的分类与新能源特点

1.2.1 能源的分类

能源也称能量资源或能源资源,是指可产生各种能量(如热量、电能、光能和机械能等)或可做功的物质的统称。

能源可分为不同的类型,按其来源可分为:

(1) 来自地球外部天体的能源(主要是太阳能)。它除直接辐射外,并为风能、水能、生物能和矿物能源等的产生提供基础。人类所需能量的绝大部分都直接或间接地来自太阳。正是各种植物通过光合作用把太阳能转变成化学能在植物体内贮存下来。煤炭、石油、天然气等化石燃料也是由古代理在地下的动植物经过漫长的地质年代形成的。它们实质上是由古代生物固定下来的太阳能。此外,水能、风能、波浪能、海流能等也都是由太阳能转换来的。

(2) 地球本身蕴藏的能量。它通常指与地球内部的热能有关的能源和与原子核反应有关的能源,如原子核能、地热能等。温泉和火山爆发喷出的岩浆就是地热能的表现。地球可分为地壳、地幔和地核三层,它是一个大热库。地壳就是地球表面的一层,一般厚度为几千米至70km不等。地壳下面是地幔,它大部分是熔融状的岩浆,厚度为2900km。火山爆发一般是这部分岩浆喷出。地球内部为地核,地核中心温度为2000 $^{\circ}\text{C}$ 。可见,地球上的地热资源贮量也很大。

(3) 地球和其他天体相互作用而产生的能量,如潮汐能。

根据能源的形成条件和利用特点,能源又可分为一次能源和二次能源。前者即天然能源,指在自然界现成存在的能源,如煤炭、石油、天然气、水能等。后者指由一次能源加工转换而成的能源产品,如电力、煤气、蒸汽及各种石油制品等。一次能源又分为可再生能源(水能、风能及生物质能等)和非可再生能源(煤炭、石油、天然气、油页岩等)。其中煤炭、石油和天然气三种能源是一次能源的核心,它们成为全球能源的基础;除此以外,太阳

能、风能、地热能、海洋能、生物质能及核能等可再生能源也被包括在一次能源的范围内。二次能源则是指由一次能源直接或间接转换成其他种类和形式的能量资源，如电力、煤气、汽油、柴油、焦炭、洁净煤、激光和沼气等能源都属于二次能源。

1.2.2 新能源特点

新能源的各种形式都是直接或者间接地来自于太阳或地球内部深处所产生的热能，包括了太阳能、风能、生物质能、地热能、水能和海洋能，以及由可再生能源衍生出来的生物燃料和氢所产生的能量。

新能源包括各种可再生能源和核能。相对于传统能源，新能源普遍具有污染少、储量大的特点，对于解决当今世界严重的环境污染问题和资源（特别是化石能源）枯竭问题具有重要意义。同时，由于很多新能源分布均匀，对于解决由能源引发的战争也有着重要意义。

新的生产方式必然要替代落后的生产方式，这是不以人们意志为转移的。新的能源体系和由新技术支撑的能源利用方式，以及新的能源利用理念最终会代替传统的能源利用方式。所以，新能源技术的关键是针对传统能源利用方式的先进性和替代性，主要包含：①高效利用能源；②资源综合利用；③可再生能源；④替代能源；⑤节能。

1.3 新能源发电技术

1.3.1 新能源发电技术的应用

1. 风力发电

地球风能约为 2.74×10^9 MW，可利用风能为 2×10^7 MW，是地球水能的 10 倍。只要利用上地球 1% 的风能就能满足全球能源的需要。我国探明风能理论储量为 32.26 亿 kW，而陆上可开发利用为 2.53 亿 kW，近海可利用风能为 7.5 亿 kW。风力发电是目前新能源开发技术最成熟，最有规模化商业开发前景的发电方式，也是世界上增长最快的新能源，在新能源发电装机容量中位居第一。欧洲风能协会和绿色和平组织预测，2020 年全世界的风力发电装机容量将达到 12.31 亿 kW，年安装量达到 1.5 亿 kW，届时风力发电量将占到全世界发电总量的 12%。1973 年发生石油危机，让美国、西欧等发达国家为寻求替代化石燃料能源，投入了大量经费，用新技术研制现代风力发电机组。20 世纪 80 年代开始建立示范风电场，成为电网新能源。到了 90 年代对环境保护的要求日益严格，特别是要兑现减排 CO₂ 等温室效应气体的承诺，风力发电得到迅猛发展，风力发电的装机容量不断提高。

2. 太阳能发电

太阳能发电系统（也称光伏发电系统）由光伏电池组、光伏控制器、蓄电池（组）组成。太阳能发电的基本原理是利用光电效应，在阳光照到太阳能板上时直接产生光生电流。光伏电池是太阳能发电系统中的核心部分，也是太阳能发电系统中价值最高的部分。其作用是将太阳的辐射能转换为电能，或送往蓄电池中存储起来，或推动负载工作。电池的质量和成本将直接决定整个系统的质量和成本。目前，光伏电池主要有单晶硅、多晶硅、非晶态硅 3 种。单晶硅光伏电池变换效率最高，已达到 20% 以上，但价格也最贵。非晶态硅光伏电池变换效率最低，同时价格也最便宜。目前，在世界范围内已建成多个兆瓦级的联网光伏电站。

3. 燃料电池发电

燃料电池是一种将储存在燃料和氧化剂中的化学能，直接转化为电能的装置。当从外部源源不断地向燃料电池供给燃料和氧化剂时，它可以连续发电。燃料电池是一种电化学装置，其组成与一般电池相同。其单体电池是由正负 2 个电极（负极即燃料电极，正极即氧化剂电极）及电解质组成。一般电池的活性物质贮存在电池内部，因此，限制了电池容量，而燃料电池的正、负极本身不包含活性物质，只是催化转换元件。因此，燃料电池是把化学能转化为电能的能量转换机器。电池工作时，燃料和氧化剂由外部供给进行反应。原则上只要反应物不断输入，反应产物不断排除，燃料电池就能连续地发电。

燃料电池具有高效率、无污染、建设周期短、易维护及成本低的特点，它不仅是汽车最有前途的替代清洁能源，还能广泛用于航天飞机、潜艇、水下机器人、通信系统、中小规模电站、家用电源，而且非常适合提供移动、分散电源和接近终端用户的电力供给，同时能解决电网调峰问题。随着燃料电池的商业化推广，市场前景十分广阔。人们预测，燃料电池将成为继火电、水电、核电后的第 4 代发电方式，它将引发 21 世纪新能源与环境保护的绿色革命。

4. 生物质能发电

生物质能是指所有可以作为能源使用的源于植物的物质。植物的成长通过光合作用，绿色植物的叶绿素吸收阳光与植物吸收的 CO_2 和水合成碳水化合物，把太阳能转变成生物质的化学能固定下来。因此，生物质能在本质上是来源于太阳能，即为太阳能的有机储存。生物质能源资源主要是指：①农作物和水生植物可作燃料使用的部分，如甘薯、木薯、玉米、小麦、水稻、高粱、番薯等和产生糖类的甘蔗、甘草、果实等及其秸秆（玉米秸、稻草、棉秆等）。②合理采伐的薪柴、原木采伐和木材加工的剩余物或废弃物。③水生藻类和微生物。④可提炼石油的植物类，如橡胶树、蓝珊瑚、桉树等。⑤能源植物，如麻风树、黄连木等。⑥人畜粪便。⑦农副产品加工后的有机废弃物，有机废水、废渣。

5. 潮汐发电

潮汐发电是利用潮水涨、落产生的水位差具有的势能发电，也就是把海水涨、落潮的能量变为机械能，再把机械能转变为电能发电的过程。具体地说，潮汐发电就是在海湾或有潮汐的河口建一拦水堤坝，将海湾或河口与海洋隔开构成水库，再在坝内或坝房安装水轮发电机组，然后利用潮汐涨、落时海水位的升降，使海水通过轮机转动水轮发电机组发电。

6. 地热发电

地球是一个巨大的热仓库，其内部的热能通过热水、蒸汽、干热等形式，源源不断地涌出地表，为人类提供丰富而廉价的能源。根据科学家的推算，全球潜在地热的资源量约为 41 013MW，相当于现在全球能耗的 45 万倍。地热是一种洁净的可再生能源。地热发电是利用超过沸点的中、高温地热（蒸汽）直接进入并推动汽轮机，带动发电机发电，或者通过热交换利用地热来加热某种低沸点的工作流体，使之变成蒸气，然后进入并推动汽轮机，带动发电机发电。最近发展起来的“热干研过程法”地热发电法不受地理限制，可以在任何地方进行地热开采。其原理是首先将水通过压力泵压入地下 4~6km 深处，在此处岩石层的温度大约为 200℃。水在高温岩石层被加热后通过管道加压被提取到地面并输入一个热交换器中。热交换器出水推动汽轮发电机将地热转化成电能。而推动汽轮机工作的热水冷却后再重新输入到地下供循环使用。

7. 核能发电

核能的利用在世界的能源结构中占有重要地位，而铀又有着比可再生能源高得多的利用价值。自从人类发现铀裂变可释放出巨大能量以来，特别是近 50 年来，其发展和应有在世界经济发展中起到举足轻重的作用。核能主要是用于核能发电、核能海水淡化、核能制氢、核供热、舰船用动力源，以及用于太空探索空间反应堆等。传统的核能在全世界范围内已有不少国家在开发和利用，这是在核裂变的原理下形成的能源（通称核能）。它是 20 世纪人类在能源领域中的巨大成就，影响着世界经济的发展。

1.3.2 储能技术的应用

由于风能、太阳能、海洋能等多种新能源发电受到气候和天气影响很大，发电功率难以保证平稳，而电力系统要求是供需一致，电能消耗和发电量相等，一旦这个平衡遭到破坏，轻则电能质量恶化，造成频率和电压不稳，重则引发大规模停电事故。为了解决这一问题，在风力发电、太阳能光伏发电或者太阳能热发电等新能源发电设备中都配备有储能装置，在电力充足时，除了供给用户之外，多余电力可以储存起来，在晚上、弱风或者超大风发电机组停运或者停运机组过多时，发电量不足以满足负荷需求时释放出来。常用的储能技术，除了蓄电池和抽水储能电站常规储能方式外，新近发展起来的还有超导储能、飞轮储能、超级电容器储能、氢储能等。

1. 蓄电池

蓄电池相对其他储能技术有着漫长的发展岁月。铅酸蓄电池是最古老也是最成熟的蓄电池，可通过蓄电池组来提高容量，优点是成本低，缺点是电池寿命比较短。进入新世纪，各种新型的蓄电池相继开发成功，并逐渐应用于电力系统中。蓄电池储能在配电网中得到广泛应用。风力发电、太阳能光伏发电中，由于发电受季节、气候影响大，发电功率随机性大，蓄电池储能是必备的储能装置。

2. 抽水储能电站

在电力系统中，用来大规模调整系统供电峰谷的主要是抽水储能电站。抽水储能是电力系统中应用最为广泛的一种储能技术。抽水储能电站在技术上成熟可靠，容量仅受到水库容量的限制。抽水储能必须具有上下水库，利用电力系统中多余的电能，把下水库（下池）的水抽到上水库（上池）内，以位能的方式蓄能。现在抽水储能电站的能量转换效率已经提高到 75% 以上。

3. 超导储能

超导储能系统（SMES）利用由超导导线制成的线圈，将电网供电励磁产生的磁场能量储存起来，在需要的时候再将储存的电能释放回电网或作为他用。超导储能主要受运行环境的影响，即使是高温超导体也需要运行在液氮的温度下，目前技术还有待突破。

4. 飞轮储能

飞轮储能是一个被人们普遍看好的大规模储能手段，主要有 3 个技术点的突破：

- （1）高温超导磁悬浮方面的发展，使磁悬浮轴承成为可能，这样可以使摩擦阻力减到很小，能很好地实现储能供能；
- （2）高强度材料的出现，使飞轮能以更高的速度旋转，储存更多的能量；
- （3）电力电子技术的进步，使能量转换、频率控制能满足电力系统稳定安全运行的要求。

5. 超级电容器储能

超级电容器 (super capacitor) 通过极化电解质来储能。它是一种电化学元件,但其储能的过程并不发生化学反应,这种储能过程是可逆的,也正因为此超级电容器可以反复充放电数十万次。超级电容器可以被视为悬浮在电解质中的 2 个无反应活性的多孔电极板,在极板上加电,正极板吸引电解质中的负离子,负极板吸引正离子,实际上形成 2 个容性存储层,被分离开的正离子在负极板附近,负离子在正极板附近。超级电容器与常规电容器相比,具有更高的介电常数,不过技术难点在于耐压能力仍然不够高,如果能解决耐压能力这一技术难点,超级电容器的容量将大大提高。目前,超级电容器应用在小电器上比较多,如用于电动玩具等小运动器件的电源。

6. 氢储能

氢储能在电力供过于求的时候采用电解水的方式获得氢,然后低温液态存储起来,在需要的时候通过燃烧释放出来,氢也是燃料电池的主要燃料之一。但目前氢能的生产成本是汽油的 4~6 倍,其运输、存储、转化过程的成本也都比化石能源高。有人提出利用太阳能、风能和水能发电电解水,真正实现新能源产生新能源,并达到储存能量效果,真正实现“清洁的可持续利用”。

1.3.3 我国新能源的发展

我国是全球风电发展速度最快的国家。2007 年,新增风电机组 3155 台,新增装机容量 330 万 kW, 占全球总装机容量的 16.8%, 仅次于美国和西班牙。风电占全国电力装机新增容量的 3.3%, 仅次于火电和水电, 超过核电。我国风电仍保持着持续发展的后劲, 市场预期良好, 到 2013 年底, 全国累计核准风电项目容量为 137.65GW, 其中 2013 年全国新核准 413 个风电项目, 新增核准容量 30.95GW。全国共有 16 个省(区)风电累计并网容量超过 1GW, 其中内蒙古并网容量 18.33GW, 居全国之首, 河北和甘肃分别以并网 7.75GW 和 7.03GW 位居第二、三位。华北、东北、西北地区风电并网容量约占全国风电并网容量的 83.6%。

我国的光伏电池制造水平比较先进,实验室效率已经达到 21%,一般商业电池效率为 10%~14%。已建成数百座 100kW 以上的光伏电站。我国早在 1958 年就开展了燃料电池的研究工作,是世界上较早从事燃料电池研究的国家之一。天津化学电源研究所首先开展了 MCFC(熔融碳酸盐燃料电池)的研究,后来由于电池结构材料的耐腐蚀性等关键技术一时难以解决而终止。到 20 世纪 70 年代末,我国的燃料电池研究取得了一定的进展,技术水平接近当时的国际水平。20 世纪 80 年代许多单位在财力、物力极端困难及技术难度很大的情况下逐步恢复了对燃料电池的研究。中国科学院大连化学物理研究所一直从事再生型 AFC(碱性燃料电池)系统研究,并组装出千瓦级水下用的石棉膜型氯氧燃料电池。1993 年以来,我国又开展了 MCFC 电解质隔膜的工艺技术及阳极气体重整技术的深入探索。结合我国社会经济的发展状况,燃料电池的主要应用背景有四个方面:第一,将燃料电池系统用于民用发电,主要包括生活小区及较偏远地区的供电,其发电容量在数十千瓦至兆瓦级范围内,适合建立 PAFC(磷酸型燃料电池)、MCFC 和 SOFC(固体氧化物燃料电池)的燃料电池电站;第二,利用电动汽车发展的机遇,开展电动汽车用的燃料电池系统研究,这主要是指 PEMFC(质子交换膜燃料电池)系统技术的开发;第三,解决农村能源及城市垃圾场、污水处理场的能源问题,可以有计划地在以上地区开展以沼气类为燃料的燃料电池系统

的开发,调整能源供应结构,保护生态环境,促进“绿色能源”计划的逐步实现;第四,在一定的条件下,继续研究航天及军队特殊用途的燃料电池系统,如航天器、舰船、潜艇等的动力源。

生物质能发电在我国尚处于起步阶段,蔗渣/稻壳燃烧发电、稻壳气化发电和沼气发电等技术已得到应用,总装机容量约为800MW。深圳垃圾发电厂已运行7年,为垃圾发电在我国的发展积累了一定的经验,这将解决我国城市垃圾处理问题,带来新的希望和契机。

世界上第一座潮汐电站是法国的朗斯河口电站,其装机容量为24kW。我国沿海已建成9座小型潮汐电站,1980年建成的江夏潮汐电站是我国第一座双向潮汐电站,也是目前世界上较大的一座双向潮汐电站,其总装机容量为3200kW,年发电量为1070万kWh。

我国地热发电研究在新中国成立后开始,于1970年,中国科学院在广东省丰顺县汤坑镇邓屋村建起了发电量为60kW的地热发电站。这是我国第一座地热试验发电站。1976年,全世界海拔最高的地热发电站在我国羊八井盆地上建成并成功发电,现已兴起了一座全新的地热城,地热开发利用正向综合性方向发展。目前,该电站已有8台3000kW机组,总装机容量为2.5万kW,年发电量在拉萨电网中占到45%。羊八井地热发电站目前是我国最大的地热发电站。

1.4 发展新能源的意义

大力发展新能源,不管是从节能减排,还是从发展低碳经济改善我国现有能源结构及保护生态环境,促进经济社会可持续发展等方面,都具有重要的战略意义。

发展新能源可促进国内碳排放交易市场发展,改善碳排放交易市场机制,为节能减排提供良好平台。节能减排是实现人与自然和谐相处的必然要求,是落实科学发展观的重大举措。新能源产业污染排放少,可以起到很好的减少污染物排放的效果。

发展新能源能进一步完善我国清洁能源,能够促进低碳技术发展,为发展低碳经济打下坚实基础。在气候变化和能源危机双重背景下,发展以低能耗、低污染和低排放为标志的低碳经济,不仅成为世界各国的共同选择,也被认为是人类继原始文明、农业文明和工业文明之后走向生态文明的重要途径。

发展新能源能改变我国单一的能源构成形式,对于构建新的能源体系,摆脱传统化石能源的束缚具有重要意义。化石能源如煤、石油、天然气,按目前开采速度,可供开采时间已很有限,在不远的未来将日益枯竭。新能源具有资源丰富、分布广泛、无污染、可再生等一系列优点,是国际社会公认的理想替代能源。全球新能源和可再生能源比例将占世界能源构成的50%以上,是未来的能源支柱。我国是能源消费大国,大力发展新能源以应对能源危机刻不容缓。

我国具有发展新能源丰富的资源条件和工业基础。近年来,新能源产业处于快速发展状态,一些新能源利用技术已达到商业化水平。从资源、技术和产业的角度来看,我国拥有大规模发展新能源的潜力。

在国家大力支持下,新能源产业呈现良好的发展势头,预计2020年,新能源发电装机容量为2.9亿kW,占总装机容量的17%。在未来能源结构中,新能源将扮演重要角色,对优化能源结构、保护生态环境、保障能源供应、促进经济社会可持续发展、构建和谐低碳社

会具有重要意义。但是，由于技术、体制、政策等方面原因，新能源还有很长的路要走，未来新能源的发展将是一条充满机遇和挑战之路。我国新能源产业起步晚，在技术方面和国际先进水平相比还存在很大差距，我国又是能源消费大国，化石能源已不能满足日益增长的经济需要。因此，要在优化能源结构，吸收消化国外先进技术，制定一系列利好新能源发展政策等方面加大力度，促进新能源产业又好又快发展。



思考题与习题

- 1-1 什么是一次能源和二次能源及其种类？
- 1-2 我国为什么要大力发展新能源？
- 1-3 新能源具有什么特征？