

能源互联网

孙秋野 著



科学出版社



能源互联网

孙秋野 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书分析全球化石能源和清洁能源分布及发展现状,针对世界能源发展面临的严峻挑战,从实现能源开放、互联、对等、分享等角度出发,提出一种新的能源网络结构——能源互联网。详细介绍能源互联网的概念和框架结构,同时对能源互联网中的能源接口、能源交换机、能源路由器等关键模块进行建模分析,阐述能源互联网的孤岛检测方法、能源互联网的关键节点辨识、能源互联网的分级网络控制、能源互联网的储能优化,以及能源互联网的能量评估与稳定分析。本书以作者所在校园某实验楼为主体搭建的一个狭义能源互联网(校园能源互联网)为案例,进一步研究能源互联网的结构与特性,通过实际应用发现其中存在的问题进而加以改进,展望能源互联网的发展前景。

本书可供电力企业、制造商和从事能源互联网研究和应用的人员参考,也可作为高等院校师生学习能源互联网的参考书,以及有兴趣的读者了解能源互联网的科普读物。

图书在版编目(CIP)数据

能源互联网/孙秋野著. —北京:科学出版社,2015.9

ISBN 978-7-03-045711-0

I. ①能… II. ①孙… III. ①互联网络-应用-能源-资源共享-研究
IV. ①F407.2-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 222521 号

责任编辑:张海娜 纪四稳 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 倩 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年9月第一版 开本:720×1000 1/16

2015年9月第一次印刷 印张:16 3/4

字数:334 000

定价:95.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

能源互联网(energy internet, 又称 internet of energy)的高速发展、新观点和新技术的不断涌现、社会的广泛关注, 都让作者意识到选择完成这部书的必要性和艰难性。回想 2014 年年初, 在计划写本书之前, 确实没有想到完成的过程会是如此艰辛曲折。

犹记得作者 2013 年第一次接触能源互联网, 便被这一未来能源模式所吸引, 事实上, 这个新的能源结构确实解决了很多一直困扰分布式新能源发展的瓶颈, 例如, 如何保证分布式新能源和电网的完美融合, 如何在多种能源之间自由切换且保证能源的高效利用, 而能源互联网虽然没有给出完美的解决方案, 但至少提供了一个很好的思路。此后的时间里, 作者投入了极大的热情和精力在能源互联网的理论与应用研究中, 在科技文献、新闻报道、博客甚至朋友圈中寻找每一篇哪怕有一点点关系的文章, 同时, 不断和各行各业的人探讨能源互联网可能的状况、带来的进步和需要解决的问题。在研究过程中, 作者发现, 困扰作者的问题也同时是困扰其他研究者的问题, “为什么需要能源互联网?” “能源互联网是什么样的?” “能源互联网和现有的能源网络特别是电力网络区别在哪里?” “能源互联网的发展方向是什么?” “能源互联网要解决哪些关键问题?” 等不一而足。问题千头万绪, 作者力争从小处做起, 研究其中涉及的关键设备、控制技术和调控方法。有幸, 这些研究成果得到了国内外同行的一点认可, 一些研究工作发表在 *IEEE Transactions on Power Electronics*、*IEEE Transactions on Smart Grid*、《中国电机工程学报》等国内外重要的刊物上, 并申请了相关的中国、美国和欧洲的发明专利。所有的研究都建立在作者深信未来的能源模式必将由传统的垂直化能源产供销转化为扁平化对等的能源生产与利用的基础上, 而对等与共享也是互联网思想的本质所在。在这些研究工作的基础上, 为了更好地与同行分享相关的研究成果, 推动能源互联网在全社会的认知程度, 作者开始尝试把相关的研究工作系统化, 集结成书, 力争起到抛砖引玉的作用。

能源互联网作为一个新兴的领域, 其发展速度超乎想象。2013 年想寻找与之相关的任何文字都非常困难, 仅仅不到两年的时间, 就火热到几乎每天都有新的言论或者思想产生, 而有关能源互联网的论坛、研讨以及各种组织更是遍地开花。这一概念由不为人知到被社会广泛关注, 仅仅用了一年多的时间, 不得不感慨互联网时代信息和思想的高度共享和快速传播。期间, 《中国科学》、《中国电机工程学报》、中国自动化学会等国内的权威期刊和科研机构先后出版了能源互联

网的专刊,讨论其科学技术问题,国家电网公司刘振亚董事长更是站在全球的高度提出了全球能源互联网,并出版成书,社会上也成立了众多的能源互联网论坛、协会等机构,更有学者将2014年称为能源互联网元年。但是,应该看到的是,尽管能源互联网发展得如火如荼,观点层出不穷,但是更多的都是停留在概念、模式和发展方向上的讨论,而缺乏深入到科学技术层面的研究,本书正是立足于能源互联网的基础理论和技术,力争将研究的能源互联网相关物理设备、优化方法、控制技术与读者分享,如果能够为能源互联网的发展尽到一点绵薄之力,则不负作者一年多的辛苦努力。

本书主要分为四个部分:第一部分包括第1章和第2章,总结能源互联网的产生和发展历程,提出能源互联网的基础框架和分类方法;第二部分包括第3~5章,研究能源互联网中的能源接口、能源交换机和能源路由器等三个关键硬件设备的功能、硬件拓扑和控制算法;第三部分包括第6~10章,主要研究能源互联网中的孤岛监测、关键节点辨识、网络控制、储能优化以及稳定分析等相关核心技术;第四部分包括第11章,主要通过构建一个狭义能源互联网的实验系统,来部分验证本书提出的诸多设备、方法的有效性,并从中发现存在的问题,为后续研究奠定基础。

在本书的成稿过程中,得到了众多朋友、同事的帮助,感谢作者的授业恩师张化光教授,是他把作者引入了科学研究的殿堂,感谢马大中博士、黄博南博士在本书的成稿过程中提出很多中肯的意见,博士研究生周建国、滕菲、李玉帅,硕士研究生韩仁科、张艺缤、李大双、王冰玉、刘玲、陈斯、甘瑜前、陈磊、赵霖、赵美伊也为本书的完成做了很多工作,还有远在美国求学的郭靖、已经参加工作的何志强都为本书的完成提供了帮助,在此一并感谢。同时,作者也要感谢众多的能源互联网研究者,正是站在他们的研究肩膀上,作者才能顺利地完成本书。

能源互联网目前的发展仅仅是一个开始,随着李克强总理提出的“互联网+”思想逐步渗透到社会的各行各业,能源行业也绝不会例外,能源互联网正是互联网与能源的完美融合,未来必将得到更快的发展。尽管其中还有很多观念、制度、技术等阻碍,但是,当不同能源行业的壁垒逐步被打开,社会各界力量必将以最快速度进入这一新兴的以能源互联网为核心的“自能源”时代,未来的能源模式值得人们为之奋斗和期待。

作者

2015年5月14日于东北大学

目 录

前言	
第 1 章 能源与电网	1
1.1 能源现状	1
1.1.1 能源的发展	1
1.1.2 世界能源现状	3
1.1.3 中国能源现状	5
1.2 能源利用、转换与存储	7
1.2.1 能源利用	7
1.2.2 能源转换	11
1.2.3 能源存储	13
1.3 智能化的现代电力系统	19
1.3.1 数字电力系统	20
1.3.2 FRIENDS 柔性配电系统	21
1.3.3 微网	22
1.3.4 智能电网	24
1.4 本章小结	27
第 2 章 能源互联网分类与框架	28
2.1 能源与能源互联网	28
2.1.1 能源互联网的提出	28
2.1.2 能源互联网的自能源	30
2.1.3 能源互联网的性质与分类	32
2.2 全球能源互联网	35
2.3 广义能源互联网	36
2.4 狭义能源互联网	37
2.4.1 狭义能源互联网的核心设备	39
2.4.2 狭义能源互联网的关键技术	40
2.5 能源互联网的信息技术	42
2.5.1 能源互联网中的通信	42
2.5.2 能源互联网中的软件结构	42

2.5.3	能源互联网的标准协议	45
2.6	能源互联网的继电保护方案	45
2.6.1	改进纵联保护方案	46
2.6.2	低电压加速反时限过电流保护原理	47
2.6.3	能源互联网保护配置方案	48
2.7	能源互联网与电网的交互影响	49
2.7.1	电网对能源互联网的影响	49
2.7.2	能源互联网对电网的影响	52
2.8	本章小结	58
第3章	能源互联网的能源接口	60
3.1	能源接口	60
3.2	广义能源接口	60
3.2.1	一次能源-电能接口	61
3.2.2	一次能源-热能接口	62
3.2.3	一次能源-其他形式能量接口	64
3.3	狭义能源接口	66
3.3.1	狭义能源接口中的数据采集	68
3.3.2	狭义能源接口中的信息技术	70
3.3.3	狭义能源接口的硬件设计	73
3.4	本章小结	76
第4章	能源互联网的能源交换机	77
4.1	能源交换机概述	77
4.1.1	能源交换机基本概念	77
4.1.2	能源互联系统中的能源交换机	78
4.2	三种典型能源交换机	80
4.2.1	DC/AC 交换机	80
4.2.2	DC/DC 交换机	80
4.2.3	AC/AC 交换机	81
4.3	能源交换机控制策略	81
4.3.1	下垂控制方法	81
4.3.2	数据驱动控制方法	84
4.3.3	基于多智能体的自适应协调控制	84
4.4	能源交换机与电能质量调节	93
4.4.1	能源互联网中的电能质量问题	93

4.4.2	能源交换机在电能质量调节中的应用	94
4.4.3	基于能源交换机的能源互联网三相不平衡补偿策略	94
4.5	本章小结	103
第5章	能源互联网的能源路由器	104
5.1	能源路由器总述	104
5.1.1	引言	104
5.1.2	能源路由器的总体框架	105
5.1.3	能源路由器的运行模式	107
5.2	能源路由器的功能需求	107
5.2.1	能源互联网的发电/负荷预测	107
5.2.2	能源互联网的故障隔离	108
5.2.3	能源互联网的时间同步	109
5.3	固态变压器模块的结构设计	110
5.3.1	固态变压器基本概念	110
5.3.2	能源路由器的固态变压器模块结构及工作原理	111
5.3.3	能源路由器的固态变压器模块数学建模及控制策略	114
5.3.4	仿真分析	118
5.4	能源路由器的协调控制策略	120
5.4.1	多智能体协调控制方法简介	120
5.4.2	以能源路由器为核心的能源互联网智能协调控制系统	120
5.4.3	基于多智能体包含控制算法的多个能源路由器间协调控制策略	125
5.4.4	仿真分析	128
5.5	本章小结	130
第6章	能源互联网的孤岛检测	132
6.1	孤岛效应概述及检测盲区	132
6.2	单个能源交换机的孤岛检测	134
6.2.1	旋转型 DG 孤岛检测	134
6.2.2	逆变型 DG 孤岛检测	138
6.3	多能源交换机孤岛检测	143
6.3.1	两台能源交换机均采用 AFD 法	144
6.3.2	两台能源交换机分别采用 AFD 法和 SFS 法	145
6.4	稳定性分析	146
6.4.1	孤岛检测控制器的小信号数学模型	146
6.4.2	输出滤波器与耦合电感的小信号数学模型	148

6.4.3	能源子网电源的小信号数学模型	150
6.4.4	能源子网电源根轨迹分析	151
6.5	本章小结	153
第7章	能源互联网的关键节点辨识	154
7.1	能源互联网的节点定义与节点划分	154
7.1.1	能源互联网的节点定义	154
7.1.2	能源互联网的节点划分	155
7.2	基于网络可控性的关键节点辨识方法	156
7.2.1	网络的可控性分析	157
7.2.2	基于网络可控性的关键节点辨识	160
7.2.3	仿真分析	162
7.3	基于网络最大流的关键节点辨识方法	165
7.3.1	基于网络最大流构建系统模型	166
7.3.2	基于网络最大流的关键节点辨识	167
7.3.3	仿真分析	168
7.4	本章小结	171
第8章	能源互联网的分级网络控制	173
8.1	能源互联网的网络控制架构	173
8.2	基于能源互联网结构的网络控制建模	175
8.2.1	能源接口的建模	175
8.2.2	能源交换机的建模	179
8.3	基于多智能体的能源互联网网络控制算法	182
8.3.1	能源交换机的算法切换信号设计	183
8.3.2	能源交换机层网络拓扑结构及算法设计	184
8.4	基于网络控制的能源互联网运行特性	188
8.4.1	能源互联网运行特性	188
8.4.2	基于 IEEE-34 标准节点能源互联网运行特性	192
8.5	本章小结	194
第9章	能源互联网的储能优化	195
9.1	能源互联网传输线上储能优化	195
9.1.1	逆变电源建模	195
9.1.2	互联系统间联络线功率特性分析	196
9.1.3	储能优化配置效果研究	201
9.2	基于暂态能量函数的能源互联网储能优化	204

9.2.1	能源互联网结构保留模型	205
9.2.2	结构保留模型能量函数建立	207
9.2.3	储能优化布局	209
9.2.4	储能优化配置效果研究	211
9.3	本章小结	217
第 10 章	能源互联网的能量评估与稳定分析	218
10.1	能源互联网的参数建模	218
10.1.1	电机阻尼系数建模	219
10.1.2	能源互联网逆变器/整流器功率建模	220
10.2	能源互联网的能量评估	222
10.2.1	能量函数评估方法	222
10.2.2	能源路由器的能量函数设计	223
10.2.3	能源互联网的能量函数设计	227
10.3	能源互联网的稳定性分析	229
10.4	本章小结	231
第 11 章	能源互联网的实现	232
11.1	狭义能源互联网构建	232
11.1.1	狭义能源互联网的架构	232
11.1.2	狭义能源互联网中的重要设备实现	235
11.1.3	狭义能源互联网中的接入设备	236
11.2	狭义能源互联网工作状态分析	243
11.2.1	狭义能源互联网的能源互联模式	244
11.2.2	狭义能源互联网的传统网络模式	245
11.3	狭义能源互联网监控系统	245
11.3.1	狭义能源互联网监控系统模块介绍	246
11.3.2	狭义能源互联网监控系统简介	247
11.4	本章小结	250
参考文献	251

第 1 章 能源与电网

能源是整个世界经济的重要基础,人类社会的发展与能源开发利用是息息相关的,人类历史上每次使经济产生质的飞跃都是从新型能源的利用开始的。经济的发展对能源的需求量越来越多,而今使用的传统化石能源消耗速度远远大于自然自身补给的速度,从而导致传统能源逐渐趋于枯竭,同时由于能源的不合理开发和利用所排放的有害气体导致环境破坏日益严重。从社会的可持续发展战略来看,开发和利用可再生能源替代传统化石能源是能源结构调整的重要发展方向。

电网和能源是紧密联系在一起,能源的变革必将带来电网结构的变化。与此同时,随着电力负荷的迅速增长,传统的大规模集中式供电已经显现出稳定性和可靠性问题,各个国家相继把发展电能的研究更多地转向利用清洁的可再生能源和分散的能源上,分布式发电得到快速发展,电网结构也经历着由传统大电网向智能化现代电力系统的转变。

本章主要内容如下。

- (1) 能源现状。
- (2) 能源利用、转换与存储。
- (3) 智能化的现代电力系统。

1.1 能源现状

传统能源,又称常规能源,是指在现阶段科学技术水平条件下人们已经广泛使用、技术上比较成熟的能源,如煤、石油、天然气等短期内不可再生的能源,因而人们对此有危机感是很自然的。而新能源,又称非常规能源,是指传统能源之外的各种能源形式。相对于传统能源,新能源普遍具有污染少、可再生的特点,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。

1.1.1 能源的发展

人类从钻木取火开始自觉地使用能源,直到英国发明家、第一次工业革命代表人物詹姆斯·瓦特改良蒸汽机,都称为“柴薪时代”。“柴薪时代”是环境与人类和谐共处的友善时代,但经济发展低下,作为生物燃料的柴薪不但不破坏环境,还

能满足人们生产和生活的需要。

瓦特的蒸汽机改良推动了世界经济的发展,煤炭大量涌入能源市场,那时煤炭具有最高的经济价值,称为煤炭时代。煤炭激励了工业发展,同时也造成了环境污染。

17世纪的荷兰曾取得了远高于同时期其他大国的经济成就,这依赖于荷兰蕴藏着大量可供开采的泥炭资源。这种属于煤炭早期形式的特殊燃料,成本低廉,使黄金时代的荷兰工业欣欣向荣,在很大程度上烘托了荷兰的石灰烧制和啤酒酿造两大能源密集型产业。美国环境史学者约翰·R·麦克尼尔认为,荷兰成本低廉的泥炭为这两个行业的发展提供了非常便利的基础,使荷兰成为世界上能源最密集的经济体,并且在18世纪其工业化程度和城市化程度均为全球最高。

到19世纪中叶,波兰药剂师依格纳茨·卢卡西维茨发现了更易获得石油提取煤油的方法,并于1854年在波兰克罗斯诺市附近开掘了世界上第一口油井,称为博布尔卡油矿场。19世纪,石油工业发展缓慢,提炼的石油主要用来作为油灯的燃料。20世纪初,随着内燃机的发明,全球的主要能源开始从煤炭变成了石油。由于石油在烃类的价值层次最高,所以其轻易排挤了煤炭,能源很快进入“石油时代”^[1],而这个时代的杰出代表国家便是美国。在20世纪初,美国正是依靠石油,建设了自己的第二个全国运输体系——公路以及小汽车和卡车。而此运输体系的建成促进了美国经济的进一步发展。所以美国经济的繁荣在很大程度上是建立在石油以及围绕石油建立起来的基础设施和运输体系的基础上的。在这个意义上,可以说,美国从第二次世界大战至今一直保持着世界超级大国的地位依靠的是石油提供的能源优势。至20世纪最后十年,美国通过两次海湾战争控制了世界上重要的石油资源产地和运输通道,从中东、拉美等产油国获取了大量石油,从而推动经济迅速发展,成为世界唯一的超级大国。如今,由于化石能源的枯竭问题,美国已提出了一项关于替代能源的国家安全议题,其目的为降低美国对外国石油的依赖。关于替代能源,从能源的化学结构来考虑,氢含量越高,热值也越高。木材的氢碳原子比为1:10,其质量能量密度为16.2MJ/kg;煤的氢碳原子比为1:1,其质量能量密度为24MJ/kg;而石油的氢碳原子比约为2:1,其质量能量密度为44.4MJ/kg;甲烷的氢碳原子比最高,为4:1,其总热值为54MJ/kg,比木材、煤和石油都高。正是此性质,人们把天然气作为高效的燃料来使用,而进入氢能时代。

从能源利用的发展进程中可以看出,人类为了生存发展,通过劳动不断从生态系统中获取外界物质、能量,使人类社会逐渐成为一个完整的系统,科技的进步使人类获取外界物质、能量的能力大大增加,输入系统的负熵的绝对值远大于系统内的熵增,推动人类社会向复杂有序的方向演化。从人类社会的能源演变状态来看便是柴薪时期、煤炭时期、石油时期,从人类社会的经济形态来看演变为渔猎

社会、农耕社会、工业社会。自从人类进入工业社会后,人类在自我中心主义的支配下,大肆侵占以化石能源为主的非再生能源,无节制地消耗能源,使人类社会系统内的熵呈类指数增加,最终人类社会乃至整个生态系统进入高熵状态^[2]。高熵社会无视原有生态秩序,加速物种灭绝速度,改善生态环境,引发生态危机,严重威胁人类的生存状态。为了回归低熵状态,新能源正逐渐变更人类社会能源的基础,取代以化石能源为主体的不可再生能源,使能源发展从高熵到低熵,从高碳到低碳,最终达到清洁能源。

1.1.2 世界能源现状

近年来,世界能源格局发生了重大改变,美国、中国和印度成为能源消费大国,对国际政治产生了深远影响。在各方的利益博弈下,新的世界能源格局正在形成中。

1. 能源储量与分布

世界石油生产格局发生了根本性的变化。目前世界十大石油生产国中已经有一半都非欧佩克国家,截至2013年年底,世界石油探明储量为1.6879万亿桶,足以满足53.3年的全球生产需要。中南美洲的储产比仍为全球最高。在过去的十年中,世界石油探明储量上调27%,即3500亿桶。在煤炭资源量中,2013年年底,世界已探明煤炭储量为8600亿t,美国、俄罗斯、中国、澳大利亚、印度和德国是世界前六大煤炭资源国,六国合计占世界煤炭资源的80%。根据最新的数据,截至2013年年底,全球天然气探明储量为185.7万亿 m^3 ,足以保证54.8年的生产需要。伊朗取代俄罗斯成为世界第一大天然气资源大国。在生产领域,美国取代俄罗斯成为世界上最大的天然气生产国。非化石能源中,核电发展稳中有进,截至2013年年底,全球可运行的核电反应堆有436个,总装机容量为3.72亿kW,从地区分布来看,北美、欧洲和远东仍是核电利用的主要地区。水电发展因地制宜,北美和欧洲等地区发达国家的发展重点转移到对已建水电站的更新改造;亚洲、南美等地区的多数发展中国家制订了发展规划,而非洲等地区的欠发达国家,因资金、技术等条件限制,水电开发仍面临诸多困难。风电在欧美发展步伐放缓,但在亚洲各国迅速推进。2013年,欧盟风力发电装机容量达到了1亿kW的里程碑。但因欧洲国家主权债务危机和全球经济不景气的影响,在未来几年关于风机在欧美的需求会保持在一个稳定的水平上;在亚洲,2012年中国风电装机达到6300万kW,其中并网总量达到6083万kW,发电量达到1004亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。亚洲地区国家新增风电装机容量占全球的52.1%。

2. 能源消费

新兴经济体在全球能源需求中仍占主导地位。2013年,新兴经济体的能源需求增长占80%。欧盟的能源消费持续减少,达到了自1995年以来的历史最低水平,日本的能源消费也下降到自1993年以来的最低位。

1) 石油

2013年全球石油消费增长1.4%,即140万桶/日,仅比历史平均水平高一点。与之对应,全球石油产量只增长了0.6%,即56万桶/日。2013年的全球石油贸易量增长120万桶/日,增幅为2.1%。欧洲和新兴经济体进口量的增加抵消了日本和美国的下降。中国石油净进口量达到700万桶/日,超过美国成为世界第一大石油净进口国。

2) 煤炭

亚太、美洲、欧洲仍是三大主要煤炭消费区。

3) 天然气

全球天然气消费增长1.4%,天然气占一次能源消费的23.7%。中国和美国的天然气消费增量最为显著,分别为10.8%和2.4%,占据全球81%的天然气消费增长。欧盟的天然气消费达到1999年的最低水平,印度消费下滑最多,为12.2%。

2013年全球化石能源消费仍集中在美洲、欧洲和亚太地区,如表1.1所示。

表 1.1 全球各地区化石能源消费情况

	年份	俄罗斯及中亚	中东	非洲	美洲	亚太	欧洲
石油/万桶	2012	1.69	3.76	1.67	13.19	13.89	7.07
	2013	1.76	3.86	1.69	13.14	14.39	6.84
天然气/亿 m ³	2012	4.47	3.71	1.11	9.69	5.62	5.20
	2013	4.50	3.90	1.16	9.80	5.95	3.90
煤炭/亿 t	2012	1.30	0.10	0.98	4.97	26.09	3.87
	2013	1.32	0.10	0.99	4.91	27.51	3.93

4) 非化石能源

即可再生能源,2013年可再生能源占全球能源消费的2.7%,比十年前增长了0.8%。其贡献了全球发电量的5.3%,增长16.3%。中国可再生能源消费增长量最大,其次是美国,而欧洲在可再生能源消费方面的领先者德国、西班牙和意大利则低于平均水平。在全球范围内,风能消费比2012年增加20.7%,再次占据了超过一半的可再生能源发电的增长;太阳能发电上半年增长更为迅速,比2012年增加33%;核能发电占全球能源消费的4.4%,是1984年以来的最低比重。但

核能发电量增长了0.9%，是自2010年以来的第一次增长。美国、中国、加拿大核能发电量的增长抵消了韩国、乌克兰、西班牙、俄罗斯核能发电量的下滑。核能发电占全球能源消费的4.4%；水力发电量占全球能源消费的6.7%。

据BP公司发布的《2035世界能源展望》预计，从2012年到2035年，全球能源消费将增长41%。据预计，其中95%的增长来源于新兴经济体，而北美、欧亚发达经济体的能源消费增长将非常缓慢，甚至在预测期内后几年有可能会下跌。

1.1.3 中国能源现状

1. 能源储备与分布

我国是富煤、贫油、少气的国家，长期以煤炭为主要能源，其能源分布有北多南少、西多东少、高度集中的特点。截至2012年，中国查明剩余煤炭可采储量为1145亿t，估计可再采100多年。我国石油分布较为集中，而目前估计石油可采资源储量为160亿t。由于储量的限制，我国石油大量进口，进口量占到50%。天然气资源较为贫乏，集中分布在中、西部地区，截至2012年年底，可采资源量为4.4万亿 m^3 。而我国的可再生能源中，水力资源蕴藏量可观，随着技术进步，大型水电机组国产化技术必将成熟，水利资源将成为重要补充能源。在2013年中，我国水电消费量为9116亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ (2.063亿t油当量)，比2012年增加4.8%，占世界水电消费的24.1%。在2013年中，我国核电消费量为1106亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ (0.25亿t油当量)，比2012年增加13.9%，占世界核电消费的4.4%。我国已在永久冻土区成功获取“可燃冰”，是世界上第三冻土大国，冻土区总面积达215万 km^2 ，具备良好的天然气水合物赋存条件和资源前景。相信在十年内，可燃冰的勘探理论与开发技术会得到大突破，成为替代煤炭、石油的重要能源。我国风能资源丰富，内地如内蒙古、甘肃北部、新疆北部、东南沿海及其附近岛屿都是风资源丰富区，我国可开发利用的风能资源总量为 $1\times 10^9\text{t/a}$ 。在2013年中，我国风电消费量为1319亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ (0.298亿t油当量)，比2012年增加37.8%，占世界风电消费的21.0%。而太阳能，我国2/3地区日照小时数大于2200h/a，理论储量折合标准煤达 $1.7\times 10^{12}\text{t/a}$ 。其开发利用潜力非常广阔，在2013年中，太阳能发电累计装机容量为18300MW，比2012年增加161.4%，占世界太阳能发电装机的13.1%。我国地热资源储备丰富，其储量相当于2000亿t标准煤。高温地热资源主要分布在西藏南部、四川西部、云南西部。高温发电潜力总计为2781MW，准高温地热系统的发电潜力总计为3036MW。但是我国实际地热发电装机容量还很小，不足总能量消费的0.5%。我国的工业性地热电站均分布在西藏自治区，目前作为国内规模最大的西藏羊八井高温地热电站，装机容量为25.18MW。

2. 能源消费

根据《BP 世界能源统计 2014》^[3], 总体来看, 中国能源消费增长大幅度放缓, 截至 2013 年年底, 中国的能源消费增长放缓主要体现在煤炭领域, 也包括石油。

1) 石油

2013 年, 中国能源结构中, 石油作为第二大消费燃料, 占比(17.8%)达 1991 年以来的最低值, 如图 1.1 所示。

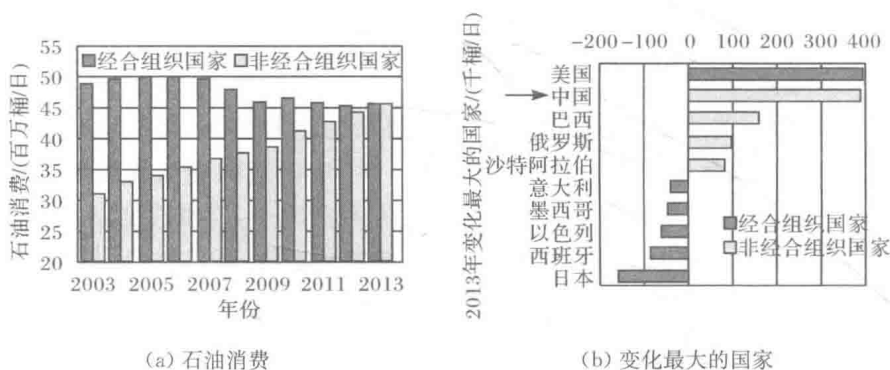


图 1.1 中国石油消费占比降至 23 年以来最低

2) 煤炭

2013 年, 中国的煤炭消费增长 4%, 不足过去十年平均水平(8.3%)的一半, 如图 1.2 所示。

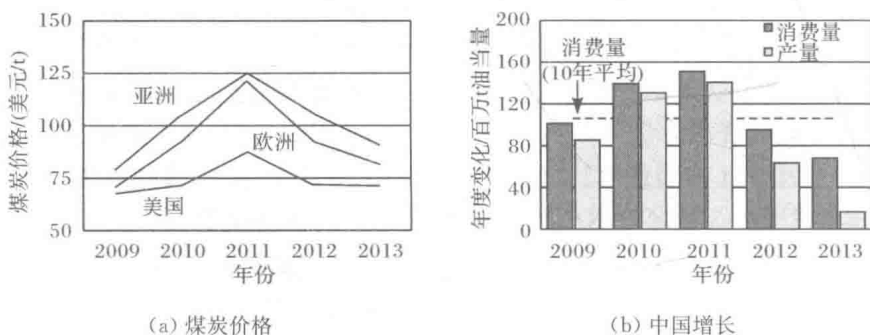


图 1.2 中国煤炭消费占比也创下新低

3) 天然气

2013 年, 中国的天然气消费(153 亿 m^3)增长 10.8%, 居世界首位。但仍有巨大的缺口需要通过增加进口予以解决。这一缺口主要通过进口液化天然气(增长 22.9%)和管道天然气(28.0%)来填补, 管道天然气多来自中亚, 如土库曼斯坦

等,如图 1.3 所示。

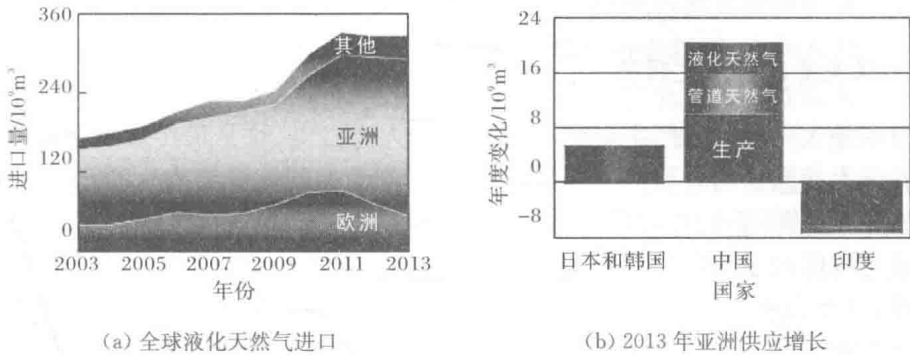


图 1.3 中国天然气消费增长居世界首位

4) 非化石能源

2013年,中国用于发电的可再生能源(940万t油当量)和水电(890万t油当量)的增长居全球之首,且核能的增长(300万t油当量)为全球第二,仅次于美国,如图 1.4 所示。

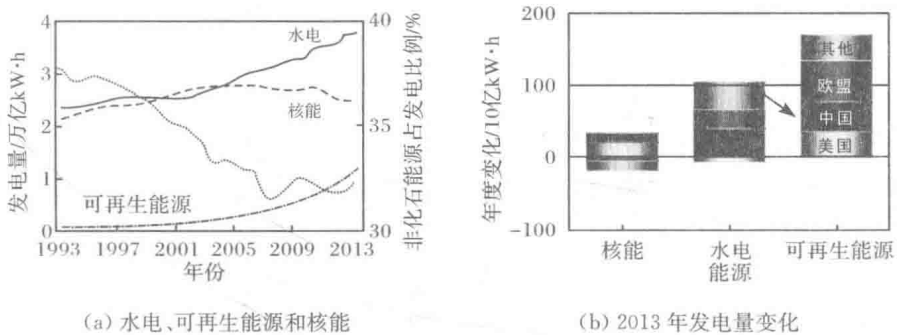


图 1.4 中国非化石能源:可再生能源、水电增长居全球之首

1.2 能源利用、转换与存储

1.2.1 能源利用

能源是社会经济发展的基础和动力,对经济发展和人民生活水平提高起着至关重要的作用。目前我国能源消费现状呈现出节节攀升的趋势,我国用于发电的能耗占总能耗的 38% 以上,而能源利用发电主要由以煤炭、石油和天然气为主的火力发电、水力发电、核电、新能源发电几部分组成。能源的开发和利用尤其重