



“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

新能源发电与并网技术

王 曼 杨素琴 编
吴在军 主审



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

新能源发电与并网技术

王 曼 杨素琴 编
吴在军 主审

常州大学图书馆
藏书章



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

责任编辑 李 强

封面设计 李 强

内 容 提 要

本书结合新能源发电技术的最新发展,系统介绍了多种新能源发电技术的原理和模型,分析了新能源发电并网对系统的影响,阐述了新能源并网关键技术的新近发展、新能源发电中应用的电力电子技术,最后对分布式电源并网和微网技术做了介绍。

本书可用作高等院校电力工程专业、电气工程及其自动化专业以及能源与动力技术等专业的本科教材,也可供从事新能源发电相关工作的专业人士参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

新能源发电与并网技术/王曼,杨素琴编. —北京:中国电力出版社,2017.9

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5198-0857-0

I. ①新… II. ①王… ②杨… 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 (2017) 第 142669 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:乔 莉 (010-63412535) 张 妍

责任校对:马 宁

装帧设计:赵姗姗

责任印制:吴 迪

印 刷:三河市百盛印装有限公司

版 次:2017 年 9 月第一版

印 次:2017 年 9 月北京第一次印刷

开 本:787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张:9.25

字 数:217 千字

定 价:30.00 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

目前加快新能源这一战略产业的发展已经成为我国的基本国策,全国新能源发电建设项目更是掀起了新一轮的热潮。2015 年我国风电新增装机容量 30.75GW,累计风电装机容量达 145.36GW;同年全国光伏发电新增装机容量 15.15GW,累计装机容量已经有 43.5GW。这样的卓越表现,令全世界瞩目。

不同于传统的常规发电形式,新能源和可再生能源发电虽然普遍具有储量大、污染少的特点,是实现国家能源战略目标的必然,但由于受自然条件和科技发展的制约,新能源电源的并网对大电网包括电能质量控制、系统的安全稳定运行和电网的优化运行控制等方面都会产生一系列的影响。能否针对新能源发电的技术特点,采取有效的措施消除其中的消极因素,扩大其对系统的正面积积极影响,实现规模化经济,成为决定新能源发电技术发展未来的重要因素之一。

本书将新能源发电技术与并网技术结合起来,在系统描述新能源发电基本原理和发展现状基础上,着重围绕新能源并网的关键技术及对大电网的影响、分布式电源并网和微电网技术进行介绍,以期构建完整系统的新能源利用技术理论。

本书共 5 章,第 1 章简单介绍了新能源基本概念和新能源发电技术应用现状;第 2 章介绍风力发电基本原理和风电系统的并网运行;第 3 章主要围绕太阳能发电技术,包括太阳能热发电和太阳能光伏发电基本原理与并网光伏发电系统;第 4 章描述了新能源发电系统中的电力电子技术,包括电力电子技术基础、新能源发电并网环节和新能源发电储能技术中的电力电子技术几个方面;有关分布式电源并网技术、微电网相关理论在第 5 章单独介绍。

本书第 1 章、第 2 章和第 4 章由王曼编写,第 3 章和第 5 章由杨素琴编写。教育部高等学校电气类专业教学指导委员会秘书长吴在军教授对全书进行了审阅。

本书编写过程中得到了南京工程学院重点教材建设项目的资助,南京工程学院电力学院各位同仁也对编者给予了大力支持,在此表示感谢。本书在编写中参考了国内外相关文献资料,感谢所有文献作者的辛勤工作。

限于编者学识水平,书中难免存在疏漏和不妥之处,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

2017 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 新能源与可再生能源概述	1
1.1 能源的概念和分类	1
1.1.1 能源的概念	1
1.1.2 能源的分类	1
1.1.3 能源与环境问题	2
1.2 新能源与可再生能源	4
1.2.1 新能源与可再生能源的含义与种类	4
1.2.2 新能源和可再生能源的主要特征	5
1.2.3 新能源与可持续发展	5
1.3 新能源发电	5
1.3.1 新能源发电的发展现状	5
1.3.2 新能源与可再生能源发电发展战略趋势	12
参考文献	13
第 2 章 风力发电及其并网技术	14
2.1 风能特性与风力资源	14
2.1.1 风能的特性	14
2.1.2 风能资源的分布	16
2.2 风力发电机组	17
2.2.1 风力机	17
2.2.2 风力发电机	20
2.3 风力发电系统的并网运行	32
2.3.1 并网风电场对电力系统的影响	32
2.3.2 风电场并网的技术要求和规范	37
2.3.3 风力发电机组的并网技术	40
参考文献	53
第 3 章 太阳能发电及并网技术	56
3.1 太阳能热发电技术	56
3.1.1 太阳能热发电技术的发展	56
3.1.2 太阳能热发电的分类	57
3.1.3 太阳能热发电站系统基本构成	59
3.2 太阳能光伏发电技术	59
3.2.1 太阳能光伏发电技术的发展	60

3.2.2	太阳能光伏发电系统的分类	61
3.2.3	太阳能光伏电池的原理	61
3.2.4	太阳能光伏发电系统设备构成	66
3.3	独立光伏发电系统	69
3.4	并网光伏发电系统	70
3.4.1	并网光伏发电系统的供电方式	71
3.4.2	光伏发电系统并网方式	72
3.5	光伏电站接入电网技术规定及其分析	74
3.5.1	光伏电站接入电网的一般原则	75
3.5.2	光伏电站并网的电能质量要求	75
3.5.3	光伏电站并网的功率控制和电压调节	75
3.5.4	光伏电站并网在电网异常时的响应	76
3.5.5	光伏电站并网的防孤岛运行	77
	参考文献	77
第4章	新能源发电中的电力电子技术	79
4.1	电力电子技术基础	79
4.1.1	电力电子器件概述	79
4.1.2	交流-直流 (AC-DC) 整流电路	82
4.1.3	直流-交流 (DC-AC) 逆变电路	86
4.1.4	直流-直流 (DC-DC) 变换电路	88
4.1.5	交流-交流 (AC-AC) 变换电路	89
4.1.6	脉宽调制控制技术 (PWM)	92
4.2	电力电子技术在新能源并网发电中的应用	96
4.2.1	利用电力电子装置实现风力发电的并网	96
4.2.2	光伏发电并网逆变器	102
4.3	新能源发电储能系统中的电力电子技术	107
4.3.1	储能变换器的结构	108
4.3.2	储能系统中的双向 DC-AC 变换	109
4.3.3	储能系统中的双向 DC-DC 变换	110
	参考文献	112
第5章	分布式电源并网及微电网	114
5.1	分布式发电概述	114
5.1.1	分布式发电的概念与特点	114
5.1.2	分布式电源的分类	115
5.1.3	分布式发电发展应用的现状	115
5.2	分布式电源并网技术	116
5.2.1	分布式电源并网影响分析	116
5.2.2	分布式电源并网技术原则	119
5.2.3	潮流计算中分布式电源并网接口模型	120

5.2.4 分布式电源并网储能技术	121
5.3 微电网	124
5.3.1 微电网的基本概念及其组成	124
5.3.2 国内外微电网技术的研究现状和发展	125
5.3.3 微电网中的关键问题及相关研究	127
5.4 孤岛现象	130
5.4.1 孤岛运行概述	130
5.4.2 孤岛检测	130
5.4.3 孤岛保护与低压穿越	131
5.5 分布式电源环境下的配电网优化规划	132
5.5.1 分布式电源给配电网规划带来的影响	132
5.5.2 分布式电源并网的接入容量研究	133
5.6 分布式电源和微电网并网标准与分析	134
5.6.1 国际组织和各国家的分布式电源并网标准	134
5.6.2 分布式电源并网标准分析	136
参考文献	137

第1章 新能源与可再生能源概述

1.1 能源的概念和分类

1.1.1 能源的概念

能源 (Energy Source), 也称作能源资源或者能量资源, 是指可以直接或经过转换间接提供人类所需的光、热、动力等形式能量的载能体资源, 是能够直接获取或者通过加工转换而取得的有用能的各种资源, 包括煤炭、石油、天然气、水能、核能、风能、太阳能、地热能、生物质能等一次能源和经加工转换而生成的电能、热力等二次能源。

能源是人类社会赖以存在的物质基础, 是国民经济发展的支柱, 人类的生活和社会的发展离不开优质能源的开发和先进能源技术的使用。能源的合理开发和有效利用程度体现了一个国家或地区生产技术和生活的先进水平。当今世界, 能源的发展利用和其使用中所引发的环境问题, 成为了世界各国社会政治经济发展的核心问题。

1.1.2 能源的分类

能源的种类繁多, 通常可以按照其形态特征、来源或应用层次等划分方式对其进行分类^[1]。

1. 一次能源与二次能源

按照其基本形态, 能源可以分为一次能源与二次能源。

在自然界中以原本的形式存在的、未经加工转换而被人类直接加以利用的天然能源称为一次能源 (Primary Energy), 包括煤炭、石油、天然气、油页岩、核能、太阳能、水能、风能、波浪能、潮汐能、地热能、生物质能和海洋温差能等。

为满足人类生产生活的不同需要, 很多能源都要进行加工, 经过间接的转换才方便利用, 由一次能源经过加工转换以后得到的能源产品, 称为二次能源 (Secondary Energy), 例如电能、蒸汽、煤气、汽油、柴油、液化石油气、酒精、沼气、氢气和焦炭等。

电能是当今世界最为重要的二次能源形式, 便于由各种一次能源进行转换, 从多种途径获得, 如煤炭、石油、天然气、水能、核能、风能、太阳能、潮汐能、地热能等都可以直接生产电能。电能也是应用最为广泛的二次能源, 动力、照明、冶金、化学、纺织、通信等各个领域中都普遍使用电能。电能是国民经济发展、科学技术飞跃的主要动力。

2. 常规能源与新能源

依据其开发利用的状况, 能源可以分为常规能源和新能源。

常规能源也称传统能源 (Conventional Energy), 指在现有科技水平和利用条件下已被大规模生产和广泛利用的能源, 是促进当前社会进步和文明发展的主要能源。现阶段, 在世界能源消费结构中占绝大部分的仍然是煤炭、石油、天然气、水能和核能, 这五大能源形式属于常规能源^[2], 但这些常规能源全球储量有限, 面临日渐枯竭的危机。

新能源 (New Energy) 是相对于常规能源而言的, 需要在新技术、新材料的基础上系统

地加以开发利用,但目前还尚未形成大规模效益或正在积极研究、有待推广的能源,如太阳能、风能、海洋能、地热能、生物质能等。与常规能源相比,新能源生产利用技术还不够成熟,使用范围还较小。

常规能源与新能源的划分是相对的,不同历史时期会产生一定的变化。如20世纪50年代初,人类首次将核能用于生产电力和作为动力使用,核能在当时被认为是一种新能源;到了20世纪80年代,随着其开发利用的日益成熟广泛,世界上很多国家已把它列为常规能源。人类利用太阳能和风能的历史比核能早得多,但早期对它们的利用效率低下,要扩大其利用范围、提高利用效率、形成规模化的经济效益还需要通过进一步的系统研究和开发,所以目前这两种能源也被列入新能源。

3. 不可再生能源和可再生能源

依据能源是否可以循环生成或重复利用,一次能源又可以分为不可再生能源和可再生能源。

不可再生能源(Non-Renewable Energy)是在地球长期演化过程中,在一定阶段,在一定条件下经过漫长地质时期形成的,与人类社会的发展相比,其再生非常缓慢或几乎不能再生。其被开发利用后在相当长的一段时间内无法恢复,随着大规模开发利用,其储量越来越少甚至枯竭。不可再生能源主要包括煤炭、石油、天然气、核能、油页岩等。

可再生能源(Renewable Energy)指在自然界中短期内可以再生得到补充,或者可以循环使用、重新利用的能源^[3],它不会因长期使用而减少储量,如太阳能、水能、风能、生物质能、波浪能、潮汐能、海洋温差能等。可再生能源在自然界可以循环再生,永续利用,不存在能源耗竭的可能。

4. 污染型能源和清洁型能源

根据其消耗后对环境产生的影响,能源可分为污染型能源和清洁型能源。

污染型能源(Pollution Energy),是指在利用过程中会污染环境的能源,如煤炭、石油类能源在燃烧使用过程中会产生大量二氧化碳、硫氧化物、氮氧化物及多种有机污染物,这些污染物,有的形成酸性降雨,破坏环境,影响生态;有的有机污染物在阳光作用下形成光氧化物,对环境和人体健康造成危害;能源物质中含有的重金属元素也会污染土壤、水域等,造成危害。

清洁能源(Clean Energy)也称绿色能源,指在生产消费过程中污染程度小甚至没有污染的能源。风能、太阳能、海洋能等在利用过程中对环境污染很小甚至不产生污染;垃圾发电、沼气等生物质能重新利用了工农业生产的废弃物,减少了对环境的不利影响。这些都属于清洁能源。

除此以外,能源还可以按性质分为燃料型能源和非燃料型能源;一次能源还可以按初始来源分为地球内部蕴藏的能量、来自地球外部天体的能源(主要是太阳能)和地球与其他天体相互作用而产生的能量等不同方式进行划分。

1.1.3 能源与环境问题

所有能源的开发利用都会对环境产生一定的影响,例如风力发电项目建设会影响地区的生态环境,如破坏植被、改变地形地貌等;太阳能的开发会占用土地、影响地区景观等。但在众多能源形式中,以化石燃料为代表的常规能源对环境造成的恶劣影响最为严重^[4]。

1. 煤炭的开采使用对环境的影响

煤炭的开采会导致生态环境的破坏,表现为地表植被状态被破坏后造成水土流失和沙漠化;煤炭开采后出现的地表塌陷、岩层移动;矿井排放酸性废水污染水资源;煤矸石等固体废弃物的堆积污染土地等。煤炭燃烧过程中会产生大量的烟尘和二氧化硫(SO_2)、二氧化碳(CO_2)、氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)、汞等污染物,造成大气的严重污染。而 SO_2 、 NO_x 等污染造成的酸雨危害极大;烟尘对人体健康造成严重的危害; CO_2 等温室气体的排放造成全球性环境问题。

2. 石油、天然气开采利用的环境影响

石油和天然气的勘探开采和加工利用也会对环境产生不利影响。油田、气田勘探开采过程中,钻井作业、油水井作业、地面工程的建设会对地区草原、水域、林地、耕地等生态环境造成不同程度的破坏。石油勘探开发过程中采油废水、钻井废水、洗井废水、处理人工注水产生的污水的排放,气田开采过程中产生的含有硫、卤素以及锂、钾、溴、铯等元素的地层水的排放都会污染周边水源或使土壤盐渍化。油气田开采过程中排放的硫化氢和含有大量二氧化硫、氮氧化物、烃类和颗粒物的炼油废气对大气产生污染。海上采油作业则影响海洋生态系统,特别是当发生井喷、漏油、海上采油平台倾覆、油轮事故和战争破坏时,石油泄入海洋,对海洋生态系统产生极其恶劣的影响。而石油产品在消耗利用时,排放的一氧化碳、碳氢化合物、氮氧化物、铅等污染物等更会产生进一步的污染。

3. 水电建设对环境的影响

水电是一种相对清洁的常规能源,但对其的开发仍会对生态环境产生多方面的不利影响。水电站筑坝蓄水,占用河道、淹没土地和地面设施造成田地丧失、森林损毁;建坝使得泥沙淤积会导致上游河道截面缩小,河床抬高,下游河岸被冲刷,引起河道变化;河流水深、水温、流速等水文的变化会使水生生物受到影响,导致种群数量减少甚至灭绝;水库的建设会改变降雨区域分布,地区降雨量有可能影响地区气候;建设水电站还会改变地下水的流量和方向,使下游地下水位升高,造成土壤盐碱化,甚至形成沼泽,导致环境卫生条件恶化等。

4. 核电利用的环境问题

核能发电清洁、高效,发电过程无须燃烧,不会造成空气污染,也不会排放二氧化碳。但是核能仍可能对环境造成严重的污染,甚至对人类社会和经济的可持续发展造成重大损害。核能利用对环境造成的污染主要是放射性污染:核燃料在生产过程存在一定的放射性污染;核能电厂在正常运转时,也会有微量的放射性物质排到外界环境;核能发电后的乏燃料和具有放射性的废水废气的排放也会对环境造成污染。核燃料的勘探开采、水冶加工和精制浓缩生产过程中,铀矿山和铀水冶厂是主要污染源。铀矿山产生的具有放射性的废水、废气、固体废物不仅含有铀、钍及其衰变子体,而且还有其它共生的有害化学物质。水冶厂的液体废物主要有贫铀溶液,其中镭是最危险的放射性物质。虽然核电站运行时对周边环境的辐射剂量并不高,但由于释放的少量放射性物质通过水、空气特别是食物链的放大效应,会造成对人体的慢性辐射,后果将相当严重。核废料具有极强烈的放射性,半衰期可长达数千年、数万年甚至几十万年。核废料的安置处理一直是核工业面临的悬而未解的难题。目前处理的基本方法是稀释分散、浓缩贮存以及回收利用。值得一提的是,人们最常关注的核能对环境的影响实际上是核事故问题即核设施发生意外情况,放射性物质外泄,造成环境污染并

使公众受到辐射危害。1986年4月26日发生的切尔诺贝利核事故,是核电发展史上惨重的灾难,对电站工作人员、事故抢救人员以及周围居民和环境造成了严重的损害。2011年3月12日,受9级特大地震影响,日本福岛第一核电站放射性物质发生泄漏,其对当地和周边国家地区产生的恶劣影响至今没有消除。

1.2 新能源与可再生能源

随着生产力的发展和科技的进步,能源需求量极大,而常规能源开发利用过程中造成自然环境不断恶化,环境的恶化又直接危及人类的生存;社会的发展导致能源需求量不断上升而常规的不可再生能源储量日益枯竭,能源危机威胁着人类的发展。人类社会面临能源与环境危机的这种双重窘迫局面,最大限度地开发利用新能源和可再生能源已经成为全世界各个国家的能源发展战略。

1.2.1 新能源与可再生能源的含义与种类

1978年12月20日,联合国第三十三届大会第148号决议将“新能源与可再生能源”作为一个专业化名称使用,规定:“新能源与可再生能源是指常规能源以外的所有能源。”并且指出新能源和可再生能源包括太阳能、地热能、风能、潮汐能、波浪能、海洋能、薪柴、木炭、生物能、畜力、油页岩、焦油砂、泥炭和水能14种。除油页岩、焦油砂和泥炭是非常规矿物能源外,其他11种都属可再生能源。

1981年8月10~21日,联合国于肯尼亚首都内罗毕召开的新能源和可再生能源会议(The United Nations Conference on New and Renewable Sources of Energy)上正式界定了新能源和可再生能源的基本含义,指出了世界开发利用新能源和再生能源的方向:以新技术和新材料为基础,使传统的可再生能源得到现代化的开发和利用,用取之不尽、周而复始的可再生能源来不断取代资源有限、对环境有污染的化石能源;它不同于常规化石能源,可以持续发展,几乎是用之不竭,对环境损害很小,有利于生态良性循环,重点是开发利用风能、太阳能、海洋能、地热能 and 氢能等。

20世纪90年代,联合国开发计划署(UNDP)把新能源和可再生能源分为大中型水电、传统生物质能和新可再生能源3大类。新可再生能源包括小水电、太阳能、风能、现代生物质能、地热能和海洋能。

可见国际组织或会议一直将新能源和可再生能源作为一个整体分类,基本上将二者视为等同^[5]。

在国内,2005年2月28日,我国第十届人民代表大会常务委员会第十四次会议通过了《可再生能源法》,并于2009年12月26日通过修正。该法规定,在我国,“所称可再生能源是指风能、太阳能、水能、生物质能、地热能、海洋能等非化石能源”。国内一直以可再生能源的概念来概括除煤炭、石油、天然气等常规化石能源以外的能源,政策法规上未曾对新能源做具体界定。在对新能源的认识上,我国政府层面一直将新能源与可再生能源视为同一概念或作为一个整体来进行看待^[5],目前主要指除常规化石能源和大中型水力发电及核能发电之外的生物质能、太阳能、风能、小水电、地热能和海洋能等一次能源以及氢能、燃料电池等二次能源。

1.2.2 新能源和可再生能源的主要特征

新能源和可再生能源共同的特征主要有：①储量大、分布广、资源丰富，普遍具备可再生性，可供人类永续利用；②能量密度即单位体积内包含的能量较低，能量比较分散；③对环境的负面影响小，开发利用过程中没有或者很少有损害生态环境的污染物的排放；④风能、太阳能、潮汐能等资源具有随机性和间歇性的特点；⑤从技术层面上说，大规模开发利用的难度大，距取得良好经济性达到规模效益有一定距离。

1.2.3 新能源与可持续发展

可持续发展（Sustainable Development）是指在不断提高人们生活质量和环境承载能力的同时，既满足人们当前生活的需要，又不损害下一代生存和发展的需要，以最小的自然消耗取得最大的社会效益和经济效益。可持续发展是一种注重长远发展的经济增长模式，是当今世界发达国家与发展中国家共同追求的理想模式。

能源的短缺和环境的恶化是当今人类社会面临的两大问题，如何能够走可持续发展的道路成为全世界的共同关注的战略性课题。常规能源与不可再生能源后备资源不足、开发利用时产生严重环境污染等一系列问题，影响和制约着人类的进一步发展。

新能源与可再生能源资源丰富，不产生或很少产生污染物，既是近期重要的补充能源，又是未来能源结构的基础，对能源的可持续发展起着重要的作用。为了满足日益增长的能源需求，解决传统能源形式的开发利用对环境造成的恶劣影响，大力开发、使用新能源是未来能源可持续、实现国民经济可持续发展的必然选择^[6]。

1992年6月，联合国人类环境与发展大会正式通过了《里约环境与发展宣言》和《21世纪议程》；2015年9月联合国可持续发展峰会上，193个成员国共同达成了《2030年可持续发展议程》，正式通过17个可持续发展目标。可持续发展目标旨在从2015年到2030年间以综合方式彻底解决社会、经济和环境三个维度的发展问题，转向可持续发展道路。

我国政府批准了《中国21世纪议程》和《中国21世纪初可持续发展行动纲要》，特别强调了开发利用新能源和可再生能源，保护环境，走可持续发展的道路，并明确提出了我国可持续发展的目标、重点领域和保障措施。

1.3 新能源发电

在发展新能源已成为全世界各国能源战略的大背景下，作为能源转换利用最为重要的一种形式，新能源发电势必成为未来电力行业发展的主题。

1.3.1 新能源发电的发展现状

依据联合国环境规划署（UNEP）2016年3月发布的年度报告《2016年全球可再生能源投资趋势》，截至2015年，除大型水力发电项目外，可再生能源的装机容量占世界总发电装机容量的16.2%，与2014年相比增长15.2%，而且这一比例在不断攀升。2015年可再生能源生产的实际电量占全球发电总量的份额从2012年的7.8%上升至10.3%，当年全球新增可再生能源发电容量达134GW，占有所有新增发电装机容量的54%，首次超过所有传统发电

技术新增容量。全球电力系统正在发生结构性转变。

1. 风力发电发展状况

风力发电是近年来发展最为迅速的新能源发电技术。全世界第一座风力发电站于 1891 年由丹麦的 P. L. Cour 教授设计建造, 容量仅 9kW, 采用了蓄电池充放电方式进行供电。自 20 世纪 80 年代世界上一些国家开始建立示范性风力发电场项目, 将风力发电纳入电力网, 成为新能源发电形式以来, 近几十年来, 风力发电一直保持着最快的增长速度, 至今全球风力发电量以年均 30% 的惊人速度快速增长^[7]。风力发电技术日益成熟, 电网对风力发电并网的技术规定越来越全面、规范, 风力发电成本持续下降, 具备了与常规能源发电竞争的优势, 日益受到世界各国的重视, 应用规模日趋壮大。

在当前全球经济继续低迷的背景下, 全球风力发电保持了良好发展势头。依据世界风能理事会 (The Global Wind Energy Council, GWEC) 2016 年 2 月发布的《2015 全球风电发展报告》^[8], 全球风力发电产业 2015 年新增装机首次超过 63GW, 达到创纪录的 63 467MW, 实现了 22% 的年度增长率; 截至 2015 年年底, 全世界风力发电总装机容量达到了 432.9GW, 同比增长超过 17%。全球风力发电历年新增装机容量和累计装机容量如图 1-1 和图 1-2 所示。目前世界上安装有商业风力发电设施的国家和地区超过 90 个, 其中 26 个国家的装机容量超过了 1GW, 而装机容量超过 10GW 的达到了 8 个。2015 年, 全球风力发电量达 186.3TWh, 占当年世界发电量的 3.3%。

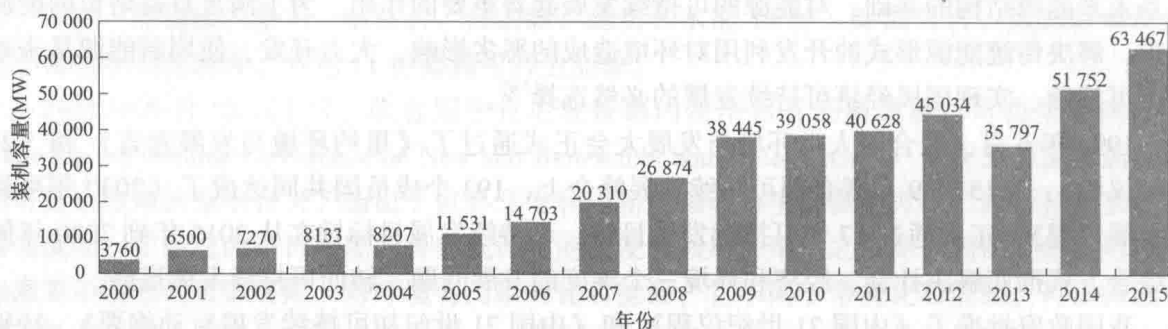


图 1-1 2000~2015 年世界风力发电年新增装机容量趋势图

(数据来源: GWEC)

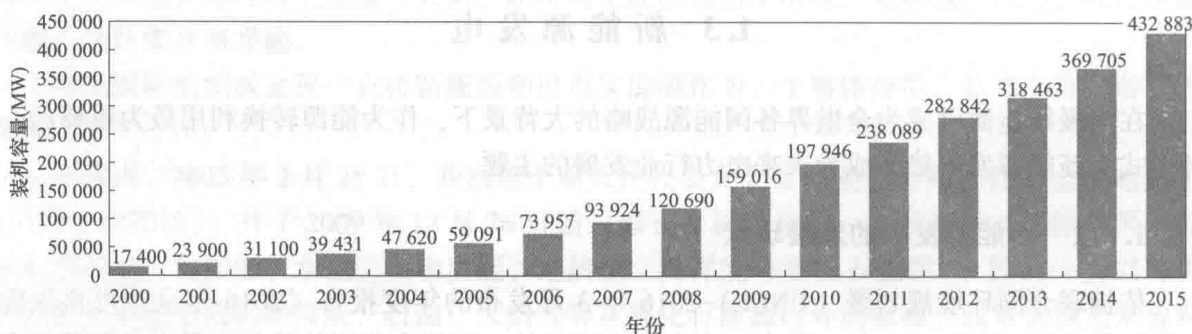


图 1-2 2000~2015 年世界风力发电累计装机容量增长趋势图

(数据来源: GWEC)

自2009年以来,中国已经成为世界最大的风电市场,2015年我国新增风电装机容量30753MW,使亚洲保持为全球风电新装最多的区域。到2015年底,我国风电累计装机容量达到145362MW,占世界风电总装机容量的36%,在累计装机容量上超越了欧盟。随着2013年西藏那曲超高海拔实验风电场的建成投产,我国风电场已经遍布全国各个省、自治区。2014年我国风力发电量153TWh,约占当年全国总发电量的2.78%,成为继火电、水电之后的第三大电源。

风力发电机单机容量不断扩大。随着新型大容量风电机组开始投入运行,风电场的装机容量将达到可以和常规机组相比拟的规模,风电机组将有能力参与整个系统的有功调度、电压和无功控制。1.5MW主流机型的风机价格在过去的几年中逐年下降,国外风电市场上的主力机型是1.5~3.6MW,而单机容量达到6~8MW的风电机组正逐步进入商业化运行阶段:丹麦维斯塔斯公司(Vestas Wind Systems A/S)的容量达8MW的风机V164-8.0已于2015年开始量产;西门子和Alstom在2012年安装了6MW的直驱型风机;在近日的欧洲海上风电展上,西门子公布了其新研发的7MW海上风电机组SWT-7.0-154;三星的7MW风机在苏格兰运行;中国的华锐、金风、明阳和联合动力也已开始测试6~6.5MW的风机模型。

目前风力发电系统研发的主要重点在于大型风电场并网方式与电网规划、风电场联网安全稳定运行、应用于风电场的储能技术、风电电能质量控制及发展海上风电机型等。

2. 太阳能发电发展现状

太阳能是人类可利用的储量最丰富的新能源之一,取之不尽用之不竭。太阳能体量巨大,据测算,太阳辐射到地球上约40min的能量就足以供全球人类一年能量的消费。从广义上来说,地球上的绝大多数能源形式,包括化石能源、风能、水能、海洋温差能、生物质能以及部分潮汐能都是来源于太阳,可以说都属于太阳能及其变化形式;从狭义上来说,太阳能指太阳辐射能的光热、光电和光化学的直接转换。

太阳能不太方便进行直接利用,大规模利用太阳能的方式主要是将太阳能转化为电能。目前,太阳能的发电形式主要有两种:①利用太阳能的热能推动汽轮机转动发电,即光热(Solar Thermal Power Generation)发电;②利用光生伏特效应将光的辐射能转化为电能,即太阳能光伏(Photovoltaic, PV)发电。

较之太阳能光伏发电,太阳能光热发电研究相对滞后,技术转化率较低,商业化成本较高。但近几年,在全球范围内光热发电也得到了快速的发展,装机容量增长迅猛:2009年底装机容量仅为700MW;到了2013年底,全球太阳能光热发电市场已投运装机容量达到约3452MW,当年新增装机约606MW,包括商业化电站和实验示范项目在内的光热发电项目数量总计达到120个左右。全世界已建成的光热发电项目主要集中在美国 and 西班牙,阿联酋、印度、伊朗、意大利、德国、澳大利亚等国家也有一定分布。目前最大的商业化太阳能槽式发电站是2013年10月投运的美国Solana槽式电站,装机容量为280MW;最大的商业化太阳能塔式发电站是2014年2月投运的美国Ivanpah光热电站,位于美国加州和内华达州交界的莫哈韦沙漠(Mojave Desert),总装机容量达392MW。预计2014~2020年,全球太阳能光热行业将继续高速发展,光热发电也已开始由美国 and 西班牙两大传统市场转向澳大利亚、中国、智利、印度和中东北非地区等新兴市场。

太阳能光热发电在我国起步较晚,但目前国内自主研发的太阳能光热发电技术也逐步开

始了商业化运作。亚洲第一座塔式太阳能光热发电站——八达岭太阳能热发电实验电站于2012年8月成功发电，该电站装机容量为1MW；2013年7月，青海中控德令哈50MW塔式太阳能热发电站一期10MW项目顺利并网发电。截至2014年底，全国已建成实现示范性太阳能热发电站（系统）6座，装机规模13.8MW，约20个试验项目（140万kW）处于前期阶段。2015年12月15日国家能源局下发了《太阳能利用十三五发展规划征求意见稿》，正式提出，到2020年底，要实现太阳能光热发电总装机容量达到1000万kW，太阳能光热利用集热面积保有量达到8亿 m^3 的目标。预计随着我国光热发电产业相关扶持政策的相继出台，必定有大量商业资本进入光热电站开发市场，更多的大型光热发电项目也将进入到快速推动阶段。

太阳能光伏发电具有布置简便、维护方便、利用起来清洁安全等特点，近十几年来应用面广泛，技术成熟，发展迅速，已逐步由补充能源向替代能源过渡，成为世界主流的电能供应形式之一。据“欧洲光伏产业协会”（European Photovoltaic Industry Association, EPIA）统计数据^[9]，2015年全球新增太阳能光伏装机容量50.6GW，相较2014年的40.3GW，同比增长25.6%；累计装机容量增长了29%，达229GW。亚洲是全球光伏装机容量增长最快的地区，中国在政府政策的大力推动下，以15.15GW的年新增装机容量居全球首位，日本凭借11GW的新增装机容量位居全球第二。从而使得中国以43.5GW的累计装机容量，首次超越德国，成为世界上光伏累计装机容量最多的国家。2000年以来，世界光伏发电年装机容量和累计装机容量变化趋势如图1-3和图1-4所示。在世界各主要国家、地区对光伏产业利好政策的扶持下，全球光伏应用市场在可预见的几年内必将保持较快增长势头。

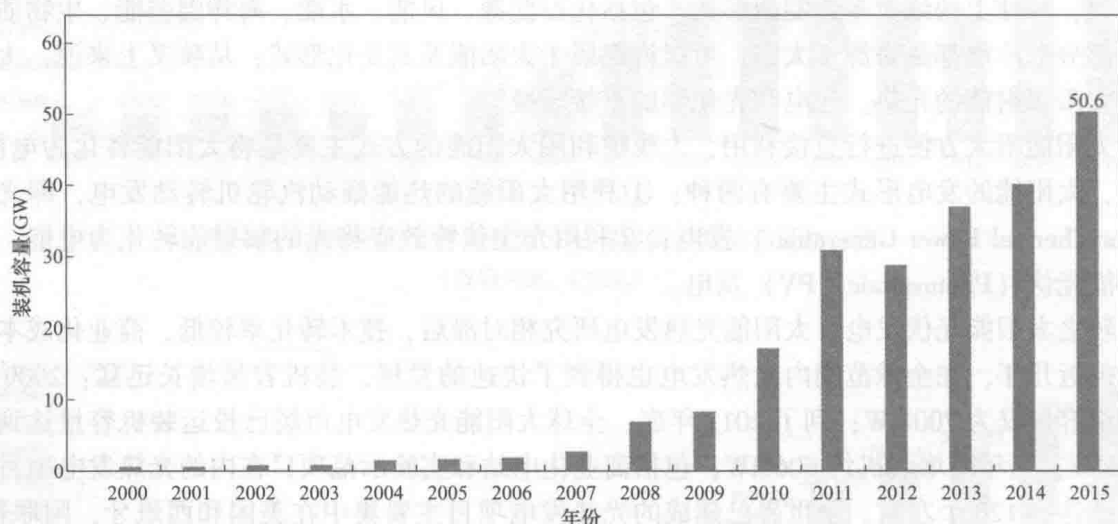


图 1-3 2000~2015 年全球光伏发电年装机容量趋势图

（数据来源：EPIA）

光伏电池产能方面，近几年太阳能电池总体呈逐年增长发展态势，发展趋向于平缓。2013年全球太阳能电池组件产能超过65GW，全年世界晶体硅太阳能电池片产量41.4GW，同比增长11.3%。从区域分布看，中国依然是最大光伏电池生产地：大陆以25.1GW的产量位居全球第一，产量约占全球总产量的63%；台湾地区依托于自身强劲的半导体产业基础，再加上美国“双反”的有利因素，产量同比增长55%，达到8.5GW，位居全球第二。此外，

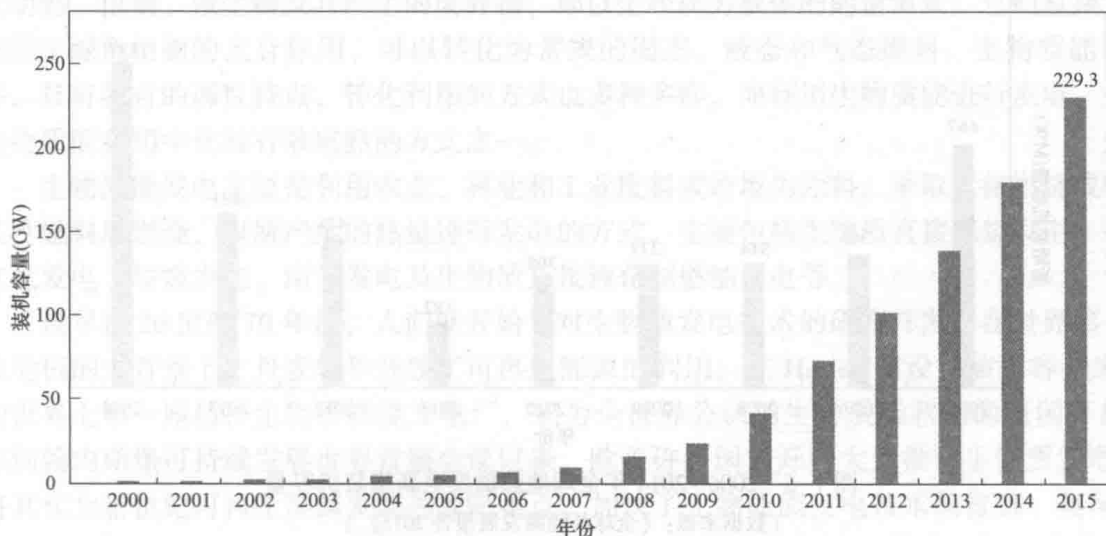


图 1-4 2000~2015 年全球光伏发电累计装机容量趋势图

(数据来源: EPIA)

马来西亚、新加坡等亚洲国家产量也已达到或接近吉瓦量级。

在光伏发电领域中,中国已经处于全球领先水平,形成了行业标准,在太阳能市场占据了主导地位,特别是在太阳能电池的生产能力等方面取得了卓越的成果。

今后光伏发电技术研发重点主要在于光伏电池板、光伏系统联网等关键技术研究,以实现逐步降低开发成本、进一步推进光伏发电技术的全面应用。全球光伏行业正由短期迅速扩张转向理性成长过渡,逐渐步入良性的发展阶段。技术的持续进步、产业的健康发展将促使光伏应用大范围平价上网时代的早日到来。但同时值得注意的是光伏行业仍然是贸易壁垒的重灾区,中国在欧洲、美国等市场还面临诸多阻碍。

3. 地热能发电状况

地热能(Geothermal Energy)是地球内部的能源资源,这种能量来自地球内部的熔岩,并以热力形式存在。地热发电是利用地下热水和蒸汽为动力源的一种新能源发电技术。其基本原理与火力发电类似,用高温高压地下蒸汽驱动汽轮机,先把地热能转换为机械能;再带动发电机发电,把机械能转换为电能。

1904年,意大利在拉德瑞罗地热田建成了世界上第一个地热发电机组,使用地热驱动0.75马力(1马力=735.499W)的发电机投入运转,为5个100W的电灯提供照明电力;1913年拉德瑞罗的250kW地热电站建成并投入使用,标志着商业性地热发电的开端。此后,新西兰、菲律宾、美国、冰岛等国家相继投入开发地热资源,各类地热发电站不断涌现。但早期受政策、科技等因素影响,地热发电站总体发展较缓慢。20世纪70年代两次世界性能源危机的爆发,引起了各国对于新能源利用的重视,地热发电技术有了长足的发展,装机容量增长较快。据统计,1980年全世界地热发电总装机容量为1960MW;而截至2014年底,地热能发电累计装机容量已达12.7GW。据2015年4月发布的《全球新能源发展报告2015》^[10],2014年全世界地热能发电新增装机容量达到887MW,已连续4年呈现加速增长的态势。2006~2014年全球地热能发电新增装机容量和累计装机容量如图1-5和图1-6所示。

目前,全世界已经有25个国家建设有地热发电站,从区域分布情况来看,亚太地区与

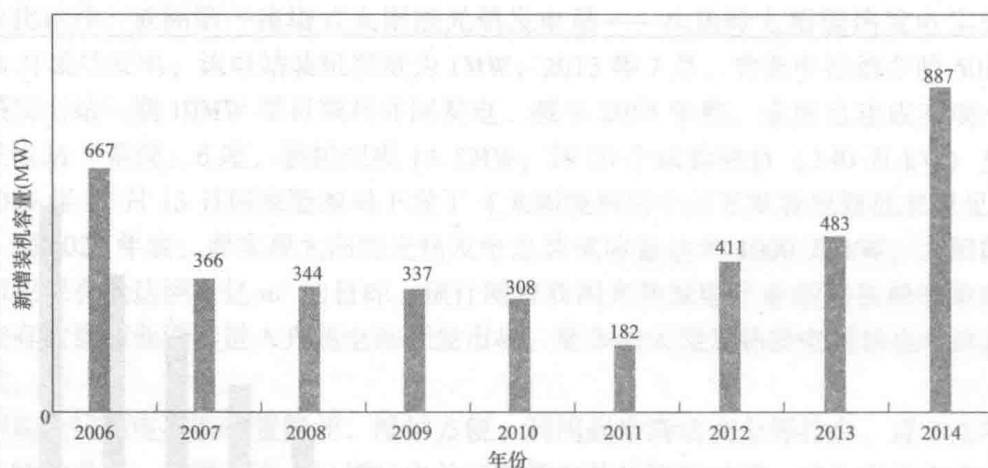


图 1-5 2006~2014 年全球地热能发电新增装机容量

(数据来源:《全球新能源发展报告 2015》)

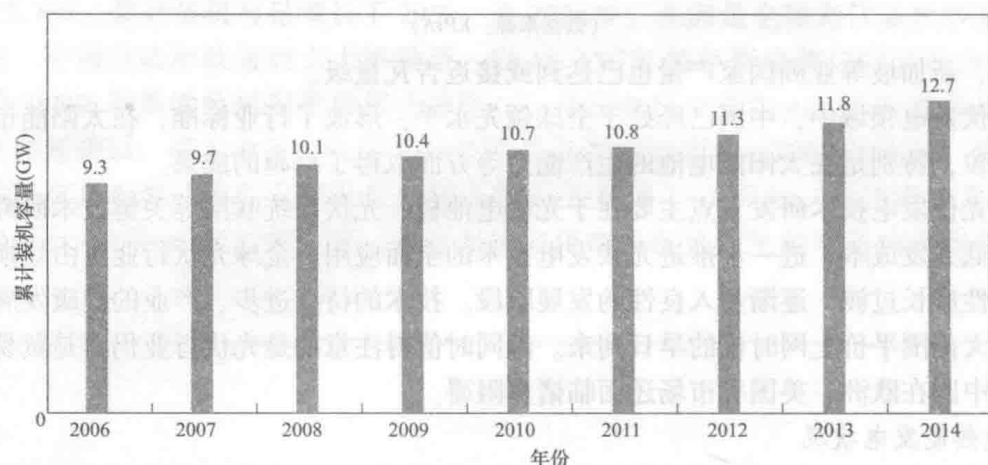


图 1-6 2006~2014 年全球地热能发电累计装机容量

(数据来源:《全球新能源发展报告 2015》)

美洲地区占主导地位, 累计装机分别为 5.04GW 和 4.65GW。2014 年亚太地区地热能发电新增装机容量为 369MW, 其中印度尼西亚达到了 202MW (包括装机容量达 110MW 的 ULU Belu 电站) 是当年亚太地区地热能发电新增装机容量最大的国家, 其根本原因, 不仅在于印度尼西亚地热能资源丰富, 更是与其政府致力于大力发展地热能发电的战略政策密不可分。截至 2014 年底, 印度尼西亚累计装机容量已达 1.45GW。美国是美洲地区地热能发电累计装机容量最大的国家, 截至 2014 年底, 累计装机容量已达到 3.15GW, 2014 年新增装机容量为 38MW, 当年最重要的地热能发电项目是由 Ormat 公司建设的采用双循环技术的 Don Campbell 项目, 装机容量为 16MW。我国 2014 年虽然在地热能发电新增装机容量方面并无较大突破, 但在国务院发布的《能源发展战略行动计划 (2014—2020 年)》中明确提出了 2020 年地热能利用规模达到 5000 万 t 标准煤的目标, 可以预见政策的激励将极大促进中国地热能发电的发展。

4. 生物质能发电发展现状

生物质能 (Biomass Energy) 指太阳能以化学能形式贮存在生物质中的能量, 包括所有