



能源与环境出版工程
(第二期)

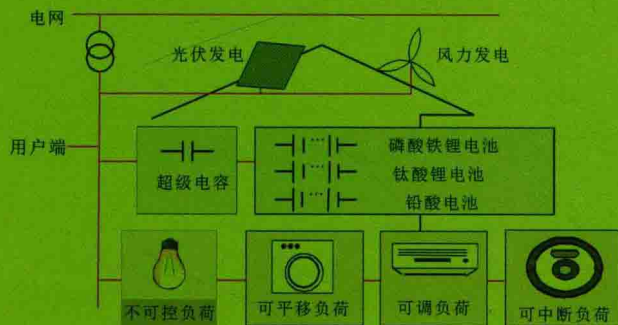
总主编 翁史烈

“十三五”国家重点图书出版规划项目
上海市文教结合“高校服务国家重大战略出版工程”资助项目

区域智能电网技术

Regional Smart Grid Technology

蔡旭 李征 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



能源与环境出版工程
(第二期)

总主编 翁史烈

“十三五”国家重点图书出版规划项目
上海市文教结合“高校服务国家重大战略出版工程”资助项目

区域智能电网技术

Regional Smart Grid Technology

蔡旭 李征 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书为“十三五”国家重点图书出版规划项目“能源与环境出版工程”之一。本书重点探索含高比例风光电源的区域智能电网综合集成技术,探索多能互补优化电源特性及输配用协同高效消纳与利用风光电源的关键技术。主要内容包括:配合大规模风电并网的风-燃互补发电控制技术、风-光-电池储能互补发电控制技术、电池储能主导的微电网技术及电池储能作为主导电源的电压源型控制技术、微电网优化运行技术、用户端源-储-荷互动技术、区域电网纵横向互动控制技术,以及上述技术在一个典型含高比例风光电源的区域电网中的综合示范应用情况及结果评估。

本书适合从事新能源并网发电控制的工程技术人员和电气工程专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

区域智能电网技术 / 蔡旭,李征著. —上海: 上海交通大学出版社, 2018
ISBN 978-7-313-19086-4

I. ①区… II. ①蔡… ②李… III. ①智能控制-电网 IV. ①TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 137548 号

区域智能电网技术

著 者: 蔡 旭 李 征

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 谈 毅

印 制: 上海万卷印刷股份有限公司

开 本: 710 mm × 1000 mm 1/16

字 数: 401 千字

版 次: 2018 年 10 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-19086-4/TM

定 价: 158.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 21.5

印 次: 2018 年 10 月第 1 次印刷



版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-56928178

能源与环境出版工程 丛书学术指导委员会

主任

杜祥琬(中国工程院原副院长、中国工程院院士)

委员(以姓氏笔画为序)

苏万华(天津大学教授、中国工程院院士)

岑可法(浙江大学教授、中国工程院院士)

郑平(上海交通大学教授、中国科学院院士)

饶芳权(上海交通大学教授、中国工程院院士)

闻雪友(中国船舶工业集团公司 703 研究所研究员、中国工程院院士)

秦裕琨(哈尔滨工业大学教授、中国工程院院士)

倪维斗(清华大学原副校长、教授、中国工程院院士)

徐建中(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

陶文铨(西安交通大学教授、中国科学院院士)

蔡睿贤(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

能源与环境出版工程 丛书编委会

总主编

翁史烈(上海交通大学原校长、教授、中国工程院院士)

执行总主编

黄 震(上海交通大学副校长、教授)

编 委(以姓氏笔画为序)

马重芳(北京工业大学环境与能源工程学院院长、教授)

马紫峰(上海交通大学电化学与能源技术研究所教授)

王如竹(上海交通大学制冷与低温工程研究所所长、教授)

王辅臣(华东理工大学资源与环境工程学院教授)

何雅玲(西安交通大学教授、中国科学院院士)

沈文忠(上海交通大学凝聚态物理研究所副所长、教授)

张希良(清华大学能源环境经济研究所所长、教授)

骆仲泐(浙江大学能源工程学系系主任、教授)

顾 璠(东南大学能源与环境学院教授)

贾金平(上海交通大学环境科学与工程学院教授)

徐明厚(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室主任、教授)

盛宏至(中国科学院力学研究所研究员)

章俊良(上海交通大学燃料电池研究所所长、教授)

程 旭(上海交通大学核科学与工程学院院长、教授)

总 序

能源是经济社会发展的基础,同时也是影响经济社会发展的主要因素。为了满足经济社会发展的需要,进入 21 世纪以来,短短十余年间(2002—2017 年),全世界一次能源总消费从 96 亿吨油当量增加到 135 亿吨油当量,能源资源供需矛盾和生态环境恶化问题日益突显,世界能源版图也发生了重大变化。

在此期间,改革开放政策的实施极大地解放了我国的社会生产力,我国国内生产总值从 10 万亿元人民币猛增到 82 万亿元人民币,一跃成为仅次于美国的世界第二大经济体,经济社会发展取得了举世瞩目的成绩!

为了支持经济社会的高速发展,我国能源生产和消费也有惊人的进步和变化,此期间全世界一次能源的消费增量 38.3 亿吨油当量中竟有 51.3% 发生在中国! 经济发展面临着能源供应和环境保护的双重巨大压力。

目前,为了人类社会的可持续发展,世界能源发展已进入新一轮战略调整期,发达国家和新兴国家纷纷制定能源发展战略。战略重点在于:提高化石能源开采和利用率;大力开发可再生能源;最大限度地减少有害物质和温室气体排放,从而实现能源生产和消费的高效、低碳、清洁发展。对高速发展中的我国而言,能源问题的求解直接关系到现代化建设进程,能源已成为中国可持续发展的关键! 因此,我们更有必要以加快转变能源发展方式为主线,以增强自主创新能力为着力点,深化能源体制改革、完善能源市场、加强能源科技的研发,努力建设绿色、低碳、高效、安全的能源大系统。

在国家重视和政策激励之下,我国能源领域的新概念、新技术、新成果不断涌现;上海交通大学出版社出版的江泽民学长著作《中国能源问题研究》(2008 年)更是从战略的高度为我国指出了能源可持续发展的健康发展之

路。为了“对接国家能源可持续发展战略,构建适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台”,我们策划、组织编写了这套“能源与环境出版工程”丛书,其目的在于:

一是系统总结几十年来机械动力中能源利用和环境保护的新技术新成果;

二是引进、翻译一些关于“能源与环境”研究领域前沿的书籍,为我国能源与环境领域的技术攻关提供智力参考;

三是优化能源与环境专业教材,为高水平技术人员的培养提供一套系统、全面的教科书或教学参考书,满足人才培养对教材的迫切需求;

四是构建一个适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台。

该学术丛书以能源和环境的关系为主线,重点围绕机械过程中的能源转换和利用过程以及这些过程中产生的环境污染治理问题,主要涵盖能源与动力、生物质能、燃料电池、太阳能、风能、智能电网、能源材料、能源经济、大气污染与气候变化等专业方向,汇集能源与环境领域的关键性技术和成果,注重理论与实践的结合,注重经典性与前瞻性的结合。图书分为译著、专著、教材和工具书等几个模块,其内容包括能源与环境领域内专家们最先进的理论方法和技术成果,也包括能源与环境工程一线的理论 and 实践。如钟芳源等撰写的《燃气轮机设计》是经典性与前瞻性相统一的工程力作;黄震等撰写的《机动车可吸入颗粒物排放与城市大气污染》和王如竹等撰写的《绿色建筑能源系统》是依托国家重大科研项目的新成果新技术。

为确保这套“能源与环境”丛书具有高品质和重大的社会价值,出版社邀请了杜祥琬院士、黄震教授、王如竹教授等专家,组建了学术指导委员会和编委会,并召开了多次编撰研讨会,商谈丛书框架,精选书目,落实作者。

该学术丛书在策划之初,就受到了国际科技出版集团 Springer 和国际学术出版集团 John Wiley & Sons 的关注,与我们签订了合作出版框架协议。经过严格的同行评审,截至 2018 年初,丛书中已有 9 本输出至 Springer,1 本输出至 John Wiley & Sons。这些著作的成功输出体现了图书较高的学术水平和良好的品质。

“能源与环境出版工程”从 2013 年底开始陆续出版,并受到业界广泛关注,取得了良好的社会效益。从 2014 年起,丛书已连续 5 年入选了上海市

文教结合“高校服务国家重大战略出版工程”项目。还有些图书获得国家级项目支持,如《现代燃气轮机装置》《除湿剂超声波再生技术》(英文版)、《痕量金属的环境行为》(英文版)等。另外,在图书获奖方面,也取得了一定成绩,如《机动车可吸入颗粒物排放与城市大气污染》获“第四届中国大学出版社优秀学术专著二等奖”;《除湿剂超声波再生技术》(英文版)获中国出版协会颁发的“2014年度输出版优秀图书奖”。2016年初,“能源与环境出版工程”(第二期)入选了“十三五”国家重点图书出版规划项目。

希望这套书的出版能够有益于能源与环境领域里人才的培养,有益于能源与环境领域的技术创新,为我国能源与环境的科研成果提供一个展示的平台,引领国内外前沿学术交流和创新并推动平台的国际化发展!



2018年9月

前 言

风光可再生能源能的开发利用是我国能源发展战略规划中的重要环节。随着风力和太阳能发电技术越来越成熟,成本不断降低,其产业化进程发展迅速,装机容量已跃居世界首位。我国风光可再生能源能的开发利用采取大规模集中开发和分布式开发并举的战略。集中开发的大规模风电场、光伏电站需要高电压接入电力系统的输电层。分布式发电与用电负荷距离较近,一般接入配电层或用电层。尽管新能源发电在电力系统中总体占比并不高,但随着电网中大规模风光电源等随机波动电源的高度渗透,在局部地区风光可再生能源装机比例已经大于50%,先期形成含高比例可再生能源的区域电网,如何安全、高效地消纳与利用风光电能成为电网面临的主要挑战。

伴随着大型风光电源在区域电网输电层的接入,引发输电功率的大幅波动及与主电网的友好交互问题。数量众多的分布式风光电源接入配电层和用电层,改变了传统电力系统能量单向流动的特性,呈现出电能双向流动的特征,引发电能质量、可再生能源的高效消纳利用问题。如何综合集成智能电网各单项技术,探索含高比例风光电源的区域电网与主网的友好互动、区域电网中高比例可再生能源的友好并网、分层分区高效高质量利用的关键技术与基本理论方法十分必要。一方面,含高比例可再生能源的区域电网对于其所接入的大电网而言增加了电网调度的难度,加大了系统调峰调频的压力和运行风险,因此需要探索提高风光电源的可调性和可控性及区域电网与大电网之间横向互动的技术手段与控制策略;另一方面,为充分利用区域电网内部各层的可控资源,促进可再生能源就近高效、高质量利用,需要研究区域电网内部输电层、配电层和用电层之间协调优化的纵向互动方法。针对接入用户端的风光电源,探索含高比例风光电源环境下微电

网及含多种能源结构的微能源网的运行、控制及能源管理技术；基于区域电网电力信息平台，探究智能电网各项技术的综合集成应用；在区域电网的输电层基于大型风光电源集群与可控电源的互补发电等效技术，实现高比例可再生能源发电的可控可调及与主网的友好互动；在配电层充分利用储能等可控资源，基于配网自动化系统的物理操作，实现广纳风光电源的主动配电网；在用户层，建立对配网友好的微电网、微能源网及互动用户。构建风光电源分层分区立体协调互动消纳与高效利用框架，实现区域电网与主网的横向互动调控、输配用三层间纵向互动控制、高比例风光电源的友好接入与分层分区高效高质量利用、安全高效运行、用户主动参与互动的区域智能电网。

本书总结了上海交通大学风力发电研究中心团队在风力发电并网控制、微电网与微能源网及储能应用领域的多年研究积累。全书由蔡旭负责定稿、李征统稿修改；第1章由蔡旭撰写，柴炜博士参与写作及整理，第2~4章由李征负责撰写，柴炜、彭思敏、王鹏博士、熊坤、顾静鸣硕士参与写作及整理；第5~8章由蔡旭负责撰写，柴炜博士、陈为赢、何舜、刘楚晖硕士参与写作及整理。感谢风电中心研究生们在相关研究中做出的贡献，感谢国家科技支撑计划“以高比例可再生能源利用为特征的智能电网综合示范工程”项目组成员及项目牵头单位国家电网上海电力公司对相关研究成果二次创新、推广应用的贡献，也感谢张迪硕士为本书统稿的文字整理和图表加工做出的贡献。

感谢国家科技支撑计划项目“以高比例可再生能源利用为特征的智能电网综合示范工程”的资助。

由于时间仓促，书中难免存在错误，恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 概述	001
1.1 含高比例可再生电源区域电网面临的挑战	003
1.2 区域智能电网技术的发展趋势	004
参考文献	005
第 2 章 配合大规模风电并网的风-燃互补发电控制技术	007
2.1 风电出力特性与预测模型	007
2.1.1 风电出力特性建模	007
2.1.2 风电出力的超短期组合预测模型	010
2.2 燃气-蒸汽联合循环机组的控制特性	014
2.2.1 CCGT 的控制系统建模	015
2.2.2 CCGT 的动态响应特性	017
2.2.3 CCGT 与风电的互补能力评价	020
2.3 风-燃互补联合发电控制策略	022
2.3.1 双层复合控制架构设计	022
2.3.2 燃机基准功率的最优化计算	023
2.3.3 风-燃互补发电的实时优化	027
2.4 风-燃互补发电控制案例分析及仿真	029
参考文献	032
第 3 章 风-光-电池储能互补发电控制技术	034
3.1 电池储能系统的控制模型	035
3.1.1 考虑多因素聚合的储能电池寿命建模	035

3.1.2	BESS 综合控制模型	037
3.2	储能-可再生能源联合发电优化控制	041
3.2.1	平抑波动控制算法	041
3.2.2	基于状态量预测的波动平抑与有功调度控制策略	046
3.2.3	提高寿命和效率的 BESS 模糊变步长优化控制方法	053
3.2.4	多运行模式下的 BESS 无功电压控制策略	061
3.3	风-储一体化风电机组及其控制	069
3.3.1	全功率变换风储一体化机组	069
3.3.2	风储一体化双馈风电机组	082
	参考文献	089
第 4 章	电池储能主导的微电网技术	092
4.1	微电网中的电池储能系统	093
4.1.1	电池储能系统关键技术	093
4.1.2	微网中电池储能变流器的传统控制方法	094
4.1.3	微网的传统控制结构	096
4.1.4	储能系统的虚拟同步发电机控制	098
4.2	电池储能系统的虚拟同步发电机控制	103
4.2.1	电池储能系统 VSG 控制的整体架构	103
4.2.2	VSG 内特性的实现	104
4.2.3	VSG 外特性的实现	105
4.2.4	电池储能变流器底层电压电流闭环设计	108
4.2.5	基于 VSG 控制的电池储能系统单机运行分析	114
4.2.6	基于 VSG 控制的电池储能系统作为主电源时微网的运行分析	119
4.2.7	微网的并网/孤岛运行模式切换	123
4.3	VSG 控制稳定性分析与参数设计	127
4.3.1	VSG 控制的小信号稳定分析	127
4.3.2	VSG 关键参数的设计	129
4.4	系统仿真与实验验证	135
4.4.1	系统仿真	135

4.4.2	实验研究	144
4.4.3	基于 RTDS 的光-储微电网稳态运行实时仿真分析	157
4.4.4	基于 RTDS 的光-储微电网暂态运行实时仿真分析	168
	参考文献	178
第 5 章	微能源网优化运行技术	182
5.1	智能能源网内的分布式能源	182
5.1.1	智能能源网的基本结构	182
5.1.2	离心式电制冷机组	183
5.1.3	冰蓄冷系统	186
5.1.4	冷热电三联供系统	188
5.1.5	地源热泵系统和油气两用锅炉	191
5.2	基于混合整数规划的微能源网稳态调度策略	192
5.2.1	智能能源网稳态经济优化调度策略设计	192
5.2.2	联合供冷系统稳态调度算法	193
5.2.3	算例仿真	196
5.3	基于分布式预测控制的微能源网动态调度策略	203
5.3.1	分布式预测控制概述	203
5.3.2	多制冷机供冷系统分布式预测控制设计	204
5.3.3	算例分析	208
5.4	基于滚动优化的微能源网管理策略	211
5.4.1	能量管理系统的结构和模型	211
5.4.2	考虑需求侧资源的能源管理系统	225
	参考文献	237
第 6 章	用户端源-储-荷互动技术	239
6.1	用户端光储一体化电能系统	240
6.1.1	系统总体拓扑结构	240
6.1.2	能量管理策略	247
6.2	用户端日前能量管理策略	251

6.2.1	四种负荷类型及其模型建立	251
6.2.2	市场电价机制与电价函数	253
6.2.3	基于用户收益最大化的日前能量管理策略	255
6.3	用户端日内调节策略	258
6.3.1	用户端多时间尺度优化控制方案	258
6.3.2	基于有效功率偏差模糊控制的日内小时级优化	259
6.3.3	基于变时间常数滤波算法的日内分钟级优化	264
6.4	仿真分析与验证	267
6.4.1	用户端日前能量管理的规划结果与分析	267
6.4.2	日内双时间尺度优化策略的控制效果与分析	272
	参考文献	278
第7章	区域电网纵横向互动控制技术	280
7.1	纵横互动结构体系	280
7.1.1	高比例可再生能源的分层消纳方案	280
7.1.2	横向互动与纵向互动的总体架构	281
7.1.3	统一信息支撑平台与综合能量管理系统	283
7.2	横向互动与频率支撑	284
7.3	纵向互动与高效消纳	286
7.3.1	配电层与用电层的互动控制	286
7.3.2	配电层与输电层互动控制	290
7.3.3	基于 NSGA-II 改进的 PSO 求解算法	292
7.4	仿真分析与验证	294
7.4.1	横向互动的仿真结果与分析	294
7.4.2	纵向互动的仿真结果与分析	296
	参考文献	300
第8章	风光高渗透区域智能电网案例分析	302
8.1	示范工程总体架构	303
8.2	各层示范应用与现场运行效果	304

8.2.1 输电层风-燃互补发电示范	304
8.2.2 配电层风电场储能并网示范	306
8.2.3 用电层智能用电示范	308
8.3 电网分层横纵向互动示范应用	309
参考文献	311
附录	312
附录 A 燃气-蒸汽联合循环机组主要参数	312
附录 B 风电场储能并网系统主要参数	313
附录 C 各电制冷机空调工况运行数据	313
附录 D 双工况电制冷机制冰工况运行数据	319
附录 E 负荷数据	320
附录 F 含风-光-荷-储的用户端主要参数	323
附录 G 区域电网的主要拓扑结构	323
索引	325

第 1 章 概 述

可再生能源的开发利用对于保障能源安全、解决环境污染问题具有重要意义^[1]。随着可再生能源发电技术的不断进步,产业规模不断扩大,其在电力系统中电源的占比越来越大^[2,3]。其中,水力发电的技术较为成熟,装机容量占比最高,但增速较为缓慢,而风力发电和太阳能发电由于技术逐步趋于成熟、成本不断降低,产业化进程发展迅速。

在全球可再生能源的开发利用中,亚洲国家的发展最为迅速,占据了 2016 年可再生能源发电新增装机容量的 58%,并以每年 13.1% 的增速稳居发展最快的区域。目前亚洲国家可再生能源发电的累计装机容量已达 812 GW,占全球可再生能源发电的累计装机容量总量的 40.5%,其中,中国可再生能源至 2016 年底累计装机容量 570 GW,占全球可再生能源发电的累计装机容量总量的 28.4%。

根据国际可再生能源理事会 (IRENA) 发布的数据^[4],2006—2016 年全球各类型可再生能源发电的累计装机容量如图 1-1 所示。虽然水力发电的占比最高,但

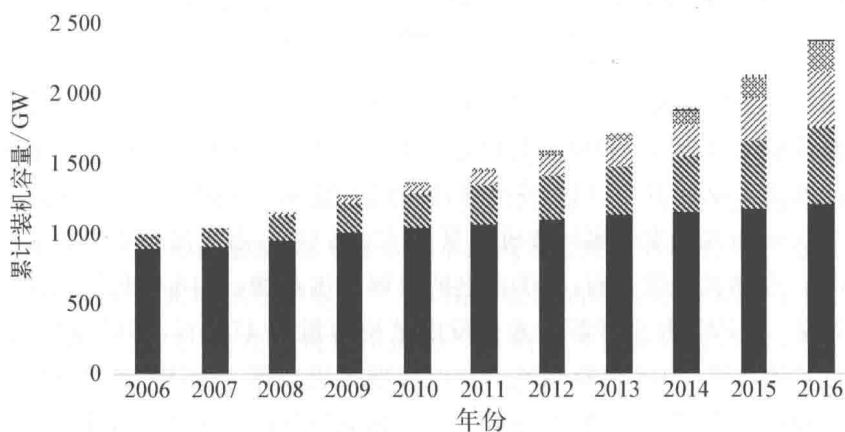


图 1-1 全球各类型可再生能源发电的累计装机容量(2006—2016 年)

■ 水利 ▨ 风能 ▩ 太阳能 ※ 生物能 # 地热能

风力发电和太阳能发电的增速更快。截至 2016 年底,全球水力发电的装机容量约占全部可再生能源发电总容量的 56%,但 2006—2016 年水力发电的年均增长率仅为 3.31%。而风力发电和太阳能发电的占比分别由 2006 年的 7.01% 和 0.63% 升至 2016 年的 23.28% 和 13.94%,年均增长率分别高达 20.65% 和 47.55%。此外,生物质能发电的累计装机容量占比相对较小,而地热能和海洋能的开发利用目前仍处于研究探索阶段^[5]。

目前,全球可再生能源发电量约占全部发电量的 23.5%,截至 2016 年末,全球可再生能源发电的累计装机容量已达 2 006 GW,2016 年新增装机容量 161 GW,年增速为 8.7%,呈逐年上升趋势。非可再生能源发电的新增装机容量则逐步放缓,并被可再生能源发电反超,2007—2016 年全球可再生能源与非可再生能源发电的新增装机容量比较如图 1-2 所示^[6],体现了世界范围内对可再生能源开发利用以及节能环保的共识。

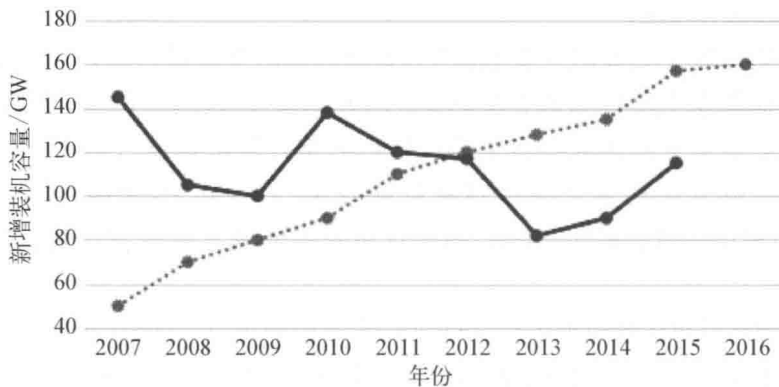


图 1-2 全球可再生能源与非可再生能源发电的新增装机容量比较(2007—2016 年)

···●··· 可再生能源发电 —●— 非可再生能源发电

我国可再生能源发电的接入比例逐年上升,截至 2016 年,中国可再生能源发电的装机容量已占全国全部电力装机容量的 34.6%,比 2015 年的可再生能源发电装机容量增加 10%。其中,风力发电累计装机容量为 149 GW,占我国全部电力装机容量的 9.0%;光伏发电累计装机容量为 77.42 GW,占我国全部电力装机容量的 4.68%。在增长速度方面,光伏发电的发展速度最快,2016 年我国光伏发电新增装机容量 34 GW,占全球新增光伏发电装机容量的 47.5%,年增速为 79.3%。风力发电紧随其后,2016 年我国风力发电新增装机容量 20 GW,占全球新增风力发电装机容量的 39.7%,年增速为 15.5%。根据国际可再生能源理事会和我国国家能源局发布的数据^[4,7,8],2006—2016 年我国各类型可再生能源发电的累计装机容量如图 1-3 所示。