



“十二五”“十三五”国家重点图书出版规划项目

新能源发电并网技术丛书

*Solid Electric-Heat Storage and
New Energy Consumption Technology*

葛维春 邢作霞 朱建新 等 编著

固体电蓄热及 新能源消纳技术



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

“十二五” “十三五” 国家重点图书出版规划项目

新 能 源 发 电 并 网 技 术 丛 书

葛维春 邢作霞 朱建新 等 编著

固体电蓄热及 新能源消纳技术



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书为《新能源发电并网技术丛书》之一，共有 7 章，第 1 章分析了“三北地区”弃风限电状况和各类储能系统特点及固体电蓄热系统特点与应用情况；第 2 章介绍了电蓄热装置研制技术中的材料遴选和匹配设计方法；第 3 章介绍了固体电蓄热系统的热力计算与设计方法；第 4 章基于多物理场耦合原理，对电蓄热结构体耦合建模与分析方法进行了介绍；第 5 章介绍了系统运行控制策略；结合调度和弃风消纳技术，分别在第 6 章和第 7 章阐述了基于柔性负荷特征的新能源消纳技术和多域新能源调度监控技术。书中融合了理论研究和工程测试验证技术，阐述了全面的柔性负荷固体电制热储能设备的研发和新能源消纳动态调度技术，可指导实际工程应用设计和应用基础理论研究。

本书可作为从事相关专业的研究和工程技术人员参考使用，也可为新能源专业的教师和学生提供借鉴。

图书在版编目（C I P）数据

固体电蓄热及新能源消纳技术 / 葛维春等编著. --
北京：中国水利水电出版社，2018. 12
（新能源发电并网技术丛书）
ISBN 978-7-5170-7262-1

I. ①固… II. ①葛… III. ①新能源—发电—电力工程 IV. ①TM61

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第297672号

书 名	新能源发电并网技术丛书 固体电蓄热及新能源消纳技术
作 者	GUTI DIAN XURE JI XIN NENGYUAN XIAONA JISHU 葛维春 邢作霞 朱建新 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 14.75 印张 331 千字
版 次	2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷
定 价	56.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

丛 书 编 委 会

主 任 丁 杰

副主任 朱凌志 吴福保

委 员 (按姓氏拼音排序)

陈 宁 崔 方 赫卫国 秦筱迪

陶以彬 许晓慧 杨 波 叶季蕾

张军军 周 海 周邺飞

本书编委会

主 编 葛维春 邢作霞

副主编 朱建新 陈 雷 王顺江 李家珏

参编人员 于洪霞 张明远 李 媛 齐凤升

颜 宁 邢军强 姜立兵 张宇献

许增金 葛延峰 陈 群



随着全球应对气候变化呼声的日益高涨以及能源短缺、能源供应安全形势的日趋严峻，风能、太阳能、生物质能、海洋能等新能源以其清洁、安全、可再生的特点，在各国能源战略中的地位不断提高。其中风能、太阳能相对而言成本较低、技术较成熟、可靠性较高，近年来发展迅猛，并开始能源供应中发挥重要作用。我国于2006年颁布了《中华人民共和国可再生能源法》，政府部门通过特许权招标，制定风电、光伏分区上网电价，出台光伏电价补贴机制等一系列措施，逐步建立了支持新能源开发利用的补贴和政策体系。至此，我国风电进入快速发展阶段，连续5年实现增长率超100%，并于2012年6月装机容量超过美国，成为世界第一风电大国。截至2014年年底，全国光伏发电装机容量达到2805万kW，成为仅次于德国的世界光伏装机第二大国。

根据国家规划，我国风电装机容量2020年将达到2亿kW。华北、东北、西北等“三北”地区以及江苏、山东沿海地区的风电主要以大规模集中开发为主，装机规模约占全国风电开发规模的70%，将建成9个千万千瓦级风电基地；中部地区则以分散式开发为主。光伏发电装机容量预计2020年将达到1亿kW。与风电开发不同，我国光伏发电呈现“大规模开发，集中远距离输送”与“分散式开发，就地利用”并举的模式，太阳能资源丰富的西北、华北等地区适宜建设大型地面光伏电站，中东部发达地区则以分布式光伏为主，我国新能源在未来一段时间仍将保持快速发展的态势。

然而，在快速发展的同时，我国新能源也遇到了一系列亟待解决的问题，其中新能源的并网问题已经成为社会各界关注的焦点，如新能源并网接入问题、包含大规模新能源的系统安全稳定问题、新能源的消纳问题以及新能源分布式并网带来的配电网技术和管理问题等。

新能源并网技术已经得到了国家、地方、行业、企业以及全社会的广泛关注。自“十一五”以来，国家科技部在新能源并网技术方面设立了多个“973”“863”以及科技支撑计划等重大科技项目，行业中诸多企业也在新能

源并网技术方面开展了大量研究和实践，在新能源并网技术方面取得了丰硕的成果，有力地促进了新能源发电产业的发展。

中国电力科学研究院作为国家电网公司直属科研单位，在新能源并网等方面主持和参与了多项国家“973”“863”以及科技支撑计划和国家电网公司科技项目，开展了大量与生产实践相关的针对性研究，主要涉及新能源并网的建模、仿真、分析、规划等基础理论和方法，新能源并网的实验、检测、评估、验证及装备研制等方面的技术研究和相关标准制定，风电、光伏发电功率预测及资源评估等气象技术研发应用，新能源并网的智能控制和调度运行技术研发应用，分布式电源、微电网以及储能的系统集成及运行控制技术研发应用等。这些研发所形成的科研成果与现场应用，在我国新能源发电产业高速发展中起到了重要的作用。

本次编著的《新能源发电并网技术丛书》内容包括电力系统储能应用技术、风力发电和光伏发电预测技术、光伏发电并网试验检测技术、微电网运行与控制、新能源发电建模与仿真技术、数值天气预报产品在新能源功率预测中的应用、光伏发电认证及实证技术、新能源调度技术与并网管理、分布式电源并网运行控制技术、电力电子技术在智能配电网中的应用等多个方面。该丛书是中国电力科学研究院等单位在新能源发电并网领域的探索、实践以及在大量现场应用基础上的总结，是我国首套从多个角度系统化阐述大规模及分布式新能源并网技术研究与实践的著作。希望该丛书的出版，能够吸引更多国内外专家、学者以及有志从事新能源行业的专业人士，进一步深化开展新能源并网技术的研究及应用，为促进我国新能源发电产业的技术进步发挥更大的作用！

中国科学院院士、中国电力科学研究院名誉院长：

周孝信



储能系统是智能电网发展必不可少的支撑技术，在大规模新能源接入、分布式发电、微电网和电动汽车等应用领域将发挥重要作用。随着我国经济快速发展，我国电力系统面临着负荷增长迅速、电力波峰波谷差距增大、电网调峰能力不足、电源结构不合理等问题，经储能系统与传统发电设施、新能源发电相结合，是有效解决新能源弃风、弃光和环境恶化问题，维护电力系统稳定的重要手段。

依据当前储能技术的发展现状，接入电力系统的大容量储能主要集中于抽水蓄能、电池储能、电蓄热储能以及压缩空气储能等，可平衡电力系统的新能源等波动电源进行调峰、调频。随着技术发展和原材料的创新性应用，电蓄热储能技术凭借其超大容量、低成本、高可靠性、电热解耦长时调峰特性等优势脱颖而出，成为新能源消纳的重要方式。

大容量蓄热的电-热联合系统，考虑电源和电能负荷（电、热负荷）的匹配，结合调度系统的 AGC 动态弃风控制，调节能力和灵活性强，能够有效解决弃风消纳和电力系统调峰等问题。目前国内针对大容量电热储能方式，如相变材料蓄热、固态蓄热、高压水储热等技术都开展了一定研究，电热解耦和联合运行模式的初期探索，以固态非金属材料（如氧化镁）等为蓄热介质的显热蓄热已达到较高水平。以大容量高电压固态蓄热柔性负荷为基础的电—热联合动态弃风调控系统，成功地解决了我国新能源发展中的弃风限电消纳问题。在东北地区，结合清洁供暖取得了显著成效，体现出大容量、高可靠性、高效能、低成本的明显优势。

本书首先针对我国清洁能源的消纳情况，分析了“三北地区”弃风限电状况和各类储能系统特点及固体电蓄热系统特点与应用情况，分别对大容量固体电蓄热装置的研制技术与接入电网调峰技术进行了介绍。针对设备研制技术中的材料遴选和匹配设计进行了描述，介绍了固体电蓄热系统的热力计

算与设计方法,基于多物理场耦合原理,对电蓄热结构体耦合建模与分析方法进行了介绍,并阐述了系统运行控制策略。结合调度和弃风消纳技术,分别阐述了基于柔性负荷特征的新能源消纳技术和多域新能源调度监控技术。书中融合了材料创新技术、传热分析与多物理场耦合建模仿真技术,并引入实际工程算例和试验、验证方法,阐述了全面的柔性负荷设备研发和动态调度技术,可指导实际工程应用设计和应用基础理论研究。

本书由葛维春、邢作霞主编,策划并审核了书籍的主要章节和相关内容;朱建新、陈雷、王顺江、李家珏为副主编,在系统应用、装置结构设计、新能源消纳调度技术方面做了主要工作。

此外,颜宁参与编写了第1章;陈雷、张明远参与编写了第2章和第3章;陈雷、齐凤升、邢军强参与编写了第4章;于洪霞、张宇献参与编写了第5章;李媛负责全书校核工作。姜立兵为本书提供了具体工程案例和运行数据。

本书在编写过程中还得到了许增金老师和赵海川、樊金鹏、董佳仪、杨成祥、张雪平等硕士研究生们的大力支持,参与了部分内容的编写、文字录入及查图绘制工作;同时得到沈阳世杰集团、沈阳兰昊新能源科技有限公司等的大力支持,在此向他们表示感谢。书中另外参考了众多文献,在此向其作者一并表示感谢。

限于作者水平和实践经验有限,书中难免有不足和待改进之处,恳请读者批评指正。

作者

2018年11月



序

前言

第1章 绪论	1
1.1 清洁能源发展现状	1
1.2 典型储能技术	10
1.3 固体电蓄热技术	26
1.4 本章小结	33
参考文献	33
第2章 高温固体电蓄热系统的材料应用技术	35
2.1 蓄热材料	35
2.2 电热材料	47
2.3 电热元件与蓄热材料传热适配性建模与分析	52
2.4 本章小结	59
参考文献	59
第3章 固体电蓄热系统设计与计算	61
3.1 固体电蓄热系统	61
3.2 固体电蓄热系统热力计算方法	64
3.3 固体电蓄热系统设备选型计算与经济性分析	89
3.4 固体电蓄热系统试验验证	96
3.5 本章小结	104
参考文献	105
第4章 固体电蓄热系统多物理场耦合建模与分析	106
4.1 固体电蓄热系统计算流体力学仿真方法	106
4.2 固体电蓄热系统多物理场耦合建模	110
4.3 多物理场耦合仿真实例分析	120
4.4 本章小结	138

参考文献 139

第 5 章 固体电蓄热系统运行控制策略 140

5.1 单体固体电蓄热系统运行控制原理 140

5.2 基于天气预报的蓄热量预测模型 145

5.3 基于天气预报的前馈加反馈的温度模糊控制策略 150

5.4 运行数据分析与控制策略验证 155

5.5 本章小结 161

参考文献 161

第 6 章 基于大容量固体电蓄热柔性负荷控制的新能源消纳技术 163

6.1 固体电蓄热柔性负荷特性 163

6.2 固体电蓄热柔性负荷控制策略 170

6.3 基于固体电蓄热负荷的新能源消纳模型 175

6.4 含固体电蓄热负荷电网的新能源消纳模型验证 177

6.5 本章小结 181

参考文献 181

第 7 章 含固体电蓄热电网的调度技术与多域新能源消纳 183

7.1 多区域电网的频率控制 183

7.2 含固体电蓄热与新能源发电的电网调度策略 190

7.3 面向大容量固体电蓄热的多域新能源消纳系统 196

7.4 新能源消纳全过程监控及验证平台 200

7.5 本章小结 203

参考文献 203

附录 205

附录 A 各地区温度参数 205

附录 B 水及水蒸气焓值表 214

附录 C 设备选型表 215

附录 D 居民供暖面积测算 216

附录 E 换热风机参数型号 218

附录 F 常用保温材料热物理性能计算参数 220

附录 G 商品电热合金线材计算用数据表 221

第 1 章 绪 论

1.1 清洁能源发展现状

1.1.1 世界清洁能源总体消纳情况

进入 21 世纪，人类正面临着资源和环境的严峻考验，大力发展清洁能源和实现经济社会可持续发展已成为当今世界的主流认识。如今，全球能源仍处于石油时代，其中：中东地区清洁能源的份额非常低，天然气及原油占主导地位；中南美洲由于水电比例较高，清洁能源发展迅速；欧洲由于光伏和生物质资源丰富，清洁能源份额非常高，利用率很高。

21 世纪初，全球清洁能源总装机容量约为 388GW，其中：风电为 193GW，小水电为 80GW，生物质和废物能源发电为 65GW，太阳能发电为 43GW，地热发电为 7GW，海洋能发电为 0.27GW。至 2016 年，全球清洁能源（核电+水电+新能源发电）的平均水平为 14.6%，我国的清洁能源份额为 13.0%，低于世界平均水平，也比美国低 14.7%。但我国的清洁能源发展很快，从 2012 年到 2016 年，当世界清洁能源发展平均水平增长 1.5% 时，我国增长了 3.7%，而美国仅增长 1.2%，我国加快了清洁能源高效利用的脚步。全球典型清洁能源发电量排行如图 1-1 所示。

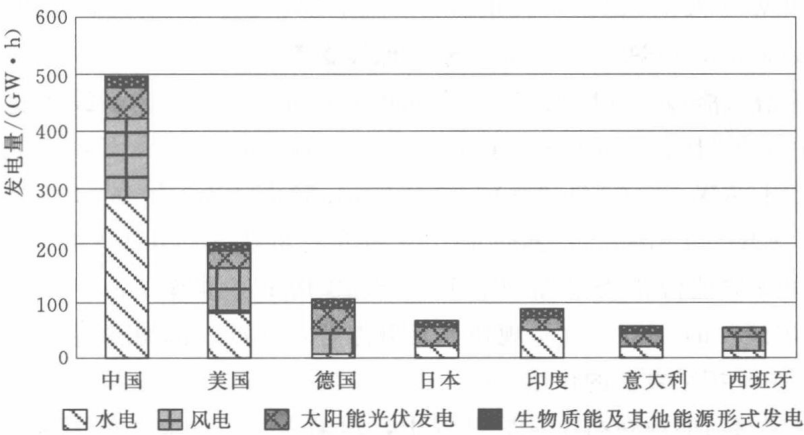


图 1-1 全球典型清洁能源发电量排行

截至 2017 年年底，美国风电装机容量接近 90GW，其中大部分是在过去 15 年安装并网的，美国风力发电占国内发电总量的 6.3%，其中爱荷华州占全国风力发电量的



37%，高于美国其他州。美国能源部估计，未来 30 年，美国风电装机容量将从 90GW 增加到 400GW 以上。

21 世纪初，德国太阳能利用的领导地位继续得到巩固，太阳能发电装机容量达到 18GW。此后，德国对清洁能源的投资也集中在小型屋顶太阳能项目上，其中 88% 的投资涉及太阳能技术，83% 的投资用于小规模太阳能项目。

截至 2016 年年底，全球水电、风电和光伏发电等可再生能源发电装机容量达 18.9 亿 kW，约占总装机容量的 30.6%。其中，欧洲和东亚是可再生能源发展程度较高的两个地区。

我国已成为新能源市场的领导者，截至 2017 年年底，全国发电装机容量达到 17.7 亿 kW，其中新能源产生 38.1%，比 2012 年增长 9.6 个百分点，是历史上增长最快的时期。据我国电力协会预测，到 2020 年，我国清洁能源发电装机容量将达到 8.1 亿 kW，占总装机容量的 41%；清洁能源发电量为 2.6 万亿 kW·h，占总发电量的 32%；到 2030 年，我国清洁能源发电装机容量将达到 15.2 亿 kW，占总装机容量的 50%，清洁能源发电量将达到 5 万亿 kW·h，占总发电量的 42%；2030 年之后，我国将不再建造新的燃煤发电厂；到 2050 年，我国清洁能源发电装机容量将达到 24.8 亿 kW，占总装机容量的 62%，清洁能源发电量将达到 8.1 万亿 kW·h，占总发电量的 58%。未来几十年，我国将持续保持清洁能源的快速增长，发电和输电技术继续维持国际先进水平。

1.1.2 我国清洁能源总体消纳情况

近年来，我国清洁能源快速发展，装机容量和发电量逐年大幅提高，截至 2017 年年底，我国清洁能源装机容量达 6.85567 亿 kW，占总装机容量（17.76 亿 kW）的 38.6%，其中水电 3.41 亿 kW（占 19.20%），风电 1.64 亿 kW（占 9.23%），太阳能发电 1.30 亿 kW（占 7.32%），核电 3580.7 万 kW（占 2.02%），生物质发电 1476 万 kW（占 0.83%），地热能、海洋能等其他能源装机容量 3 万 kW（占 0.0017%）。2017 年，我国清洁能源发电量 19453.7 亿 kW·h，占总发电量（62758 亿 kW·h）的 31.0%，其中水电 11945 亿 kW·h（占 19.0%），风电 3057 亿 kW·h（占 4.9%），太阳能发电 1182 亿 kW·h（占 1.9%），核电 2474.69 亿 kW·h（占 3.9%），生物质发电 795 亿 kW·h（占 1.3%），地热能、海洋能发电 1.5 亿 kW·h（占 0.0024%）。2017 年，我国清洁能源消费总量可折算为 6.48 亿 t 标准煤，占一次能源消费总量（44.9 亿 t 标准煤）的 14.4%，呈现快速提升态势，在推动能源转型、防治大气污染、促进绿色发展发挥了重要的作用。

然而，我国清洁能源在高速发展过程中，却陷入了“三弃”的困境。2016 年，全国共弃水电量 500 亿 kW·h、弃风电量 497 亿 kW·h、弃光电量 74 亿 kW·h，弃水、弃风和弃光率分别达 4.1%、17% 和 11%。“三弃”问题集中表现在：①“三弃”增长迅猛，2016 年弃水、弃风、弃光分别同比增加 76.7%、46.6%、57.4%；②“三弃”



分布集中，主要集中在华北、东北、西北“三北”和西南等地区；③清洁能源企业全面亏损，受上网消纳难和补贴不到位的双重影响，“三北”弃风、弃光严重地区的风力发电、太阳能发电及配套企业几乎全部陷入亏损状态，严重影响产业发展后劲和企业积极性。2017年，弃风419亿kW·h，同比减少78亿kW·h，弃风率13.7%，同比下降3.3个百分点；弃光73亿kW·h，弃光率6.2%，同比下降4.8个百分点；全年弃水515亿kW·h，水能利用率达到约96%。由此可以看出，我国“三弃”问题有了较大幅度的缓解，但离清洁能源健康发展的要求还有较大差距。

在清洁能源消纳难的同时，我国煤电装机容量持续增加，2016年新开工和投产煤电装机容量分别为3470万kW和4300万kW，煤电发电量保持1.3%的增长态势，当年全国煤炭消费量高达37.8亿t，加之煤炭清洁化利用程度低，燃煤导致华北等地雾霾日趋严重，清洁能源发电消纳难与燃煤污染急剧恶化之间的矛盾日益突出。清洁能源发电消纳已经不只是能源问题和经济问题，而是成为各界普遍关注的重大社会问题，必须引起高度重视。

2016年12月20日，《国务院关于印发“十三五”节能减排综合工作方案的通知》（国发〔2016〕74号）要求建立和完善以市场为导向的节能减排机制，实行合同能源管理、绿色标签认证、第三方环境污染控制。

1.1.3 “三北”地区新能源消纳情况

近年来，新能源的持续快速发展远远超过了电网的承载能力，新能源的消纳矛盾十分突出。“三北”地区自2009年以来首次出现弃风现象，2013年首次弃光，且范围逐渐扩大，弃光、弃风的电量逐年增加，2015年，弃光、弃风电量达到历史最高值，弃光、弃风电量分别为4.65亿kW·h和269.4亿kW·h，弃风率、弃光率分别达18.7%、14.9%。2016年第一季度，“三北”地区弃风总电量为145.7亿kW·h，同比增加75%，弃风比例达31%；弃光电量18.8亿kW·h，同比增加103%，弃光比例达21%。2017年，甘肃、吉林、辽宁等地弃风率分别为10.01%、20.62%、32.88%，弃风现象有所改善，但弃风率仍超过全国平均水平。“三北”地区部分省份和地区2015—2017年发电情况及弃风情况如图1-2和图1-3所示。

“三北”地区中，西北弃风最严重（占“三北”地区弃风总电量的60%），其次是东北地区（占“三北”弃风总电量的30%）。弃光、弃风的范围相对集中，弃风集中在甘肃、新疆、吉林和辽宁，总弃风率高达74%。“三北”地区部分省份和地区2015—2017年供暖期弃风情况如图1-4所示。

国家能源局数据显示，2016年，西北五省（自治区）中，甘肃、新疆风电运行形势最为严峻，弃风率分别为43.11%和38.37%。光伏发电方面，新疆、甘肃弃光率分别为32.23%和30.45%。国家电网数据显示，2016年，新疆、甘肃合计弃风电量占全网总弃风电量的61%，弃光电量占全网总弃光电量的80%。截至2016年年底，甘肃电网总装机容量为45762MW，其中风电12773MW，光伏发电6801MW，其中约90%的

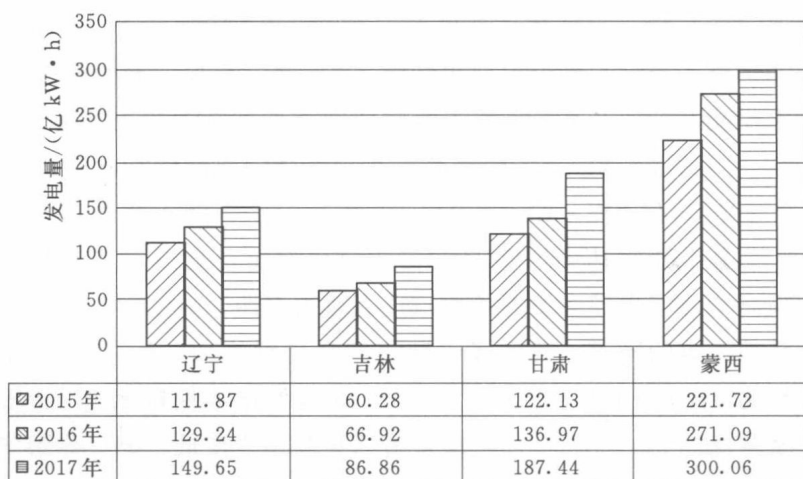


图 1-2 “三北”地区部分省份和地区 2015—2017 年发电情况

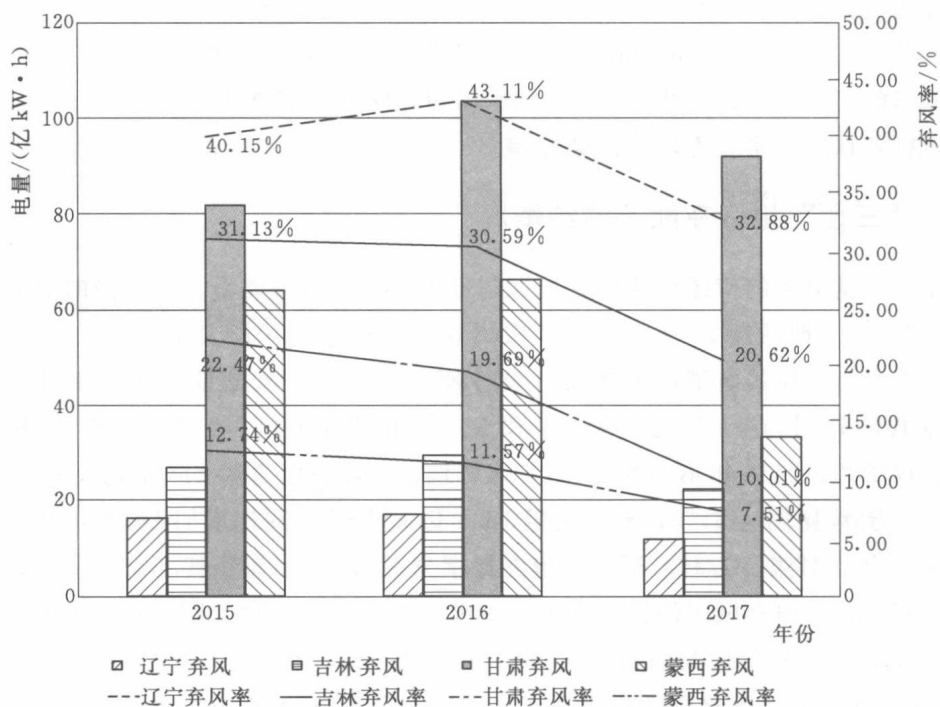


图 1-3 “三北”地区部分省份和地区 2015—2017 年弃风情况

风力发电和光伏发电集中在河西地区。2016 年甘肃省最大负荷为 13391MW，发电最大负荷为 2700MW。即使输出功率计算到负载中，装机容量与最大发电负荷之比也高达 2.84 : 1，电力供应严重超过需求。国家能源局西北监管局对西北地区新能源发展规划及运行进行监管，发布了《西北区域新能源发展规划及运行监管报告》（以下简称《报告》）。《报告》通过模拟评估 2020 年西北各省（自治区）新能源消纳水平，经与 2015 年情况对比，预测到 2020 年西北弃风率、弃光率仍然偏高，无法实现新能源全额消纳的目标，其中甘肃和新疆即使新建直流工程进行新能源外送消纳，甘肃弃风率、弃光率

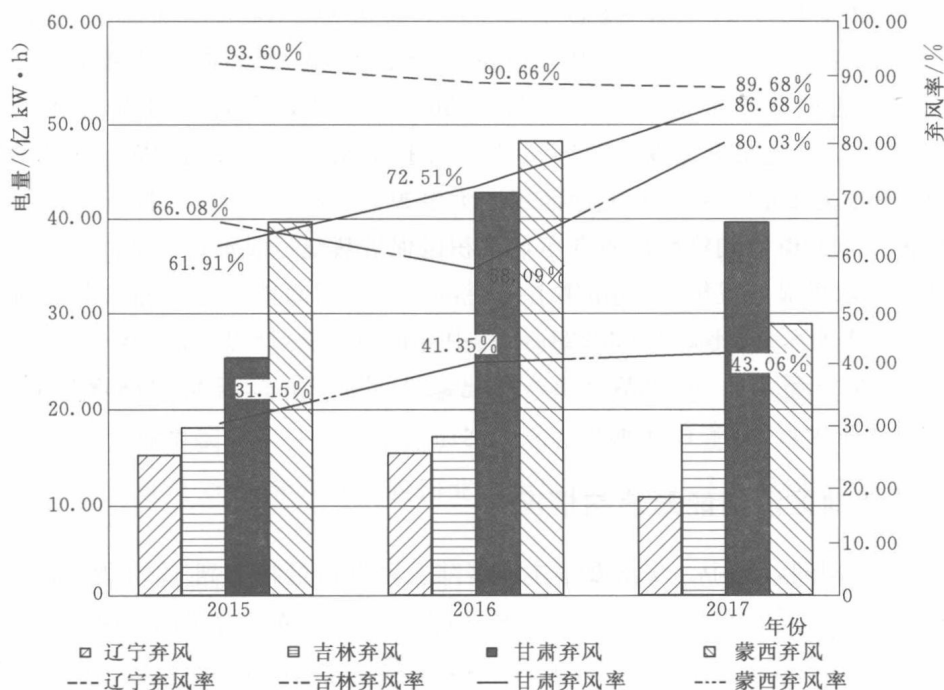


图 1-4 “三北”地区部分省份和地区 2015—2017 年供暖期弃风情况

仍然会达到 26.6% 和 29.6%，新疆弃风率、弃光率仍会达到 25.84% 和 22.38%，消纳压力较大；若不考虑新建直流工程，2020 年甘肃的弃风率和弃光率将攀升至 41.9% 和 49.1%。宁夏、青海整体弃新能源率在 10% 左右，还存在部分消纳的压力。以甘肃为例，截至 2016 年年底，甘肃电网总装机容量为 45762MW，其中，风电 12773MW，光伏发电 6801MW，甘肃省最大负荷为 13391MW，发电最大负荷为 2700MW，新能源装机容量与最大发电负荷之比高达 2.84 : 1，电力供应严重超过需求。大规模集中并网的新能源受电网、电源结构和新能源运行特性的影响，使新能源消纳面临电网用电空间“装不下”、输电通道“送不完”，安全运行“裕度低”、新能源出力变化“摸不准”等重重困难。此外，受新能源随机性波动性强、网内供热机组规模逐渐增大、黄河中上游大型水电综合利用等影响，西北电网存在调峰缺口，无法满足快速增长的新能源消纳需求，网内弃风、弃光情况严重，合理地提出新能源消纳的方法，有效地提高新能源的利用率是现在迫切需要解决的问题。

截至 2015 年 10 月底，华北电网风电装机容量已经达到 3544 万 kW，同比增长 20%，占全国风电总装机容量的 33%；光伏发电装机容量 590 万 kW，同比增长 259%。新能源装机容量占比的不断提高，使新能源发电的随机波动性愈加明显，给电网运行和新能源消纳带来挑战。如位于张家口北部的沽源 500kV 变电站，每到大风季，500kV 沽太双回线有功潮流经常在 300 万 kW 以上，而最大输电能力只有 330 万 kW，严重威胁电网的安全稳定运行。

2018 年 1—6 月，东北新能源发电量 377.33 亿 kW·h，同比增长 30.24%，占各



类电源总发电量的 15.32%，提高了 2.24 个百分点。其中，风电发电量 330.71 亿 kW·h，同比增长 22.37%；光伏发电量 46.62 亿 kW·h，同比增长 143.57%。截至 6 月底，东北地区新能源总装机容量达 3638 万 kW，占各类电源总装机容量的 25.62%。其中，风电装机容量 2796 万 kW，光伏装机容量 842 万 kW。光伏装机容量超过水电（813 万 kW），成为东北地区第三大电源。

通过扩大东北电力调峰辅助服务市场，积极促进热电厂灵活性改造，东北电网在新能源消纳方面取得显著成绩。2018 年上半年，东北全网新能源弃电量大幅下降，弃电量 18.72 亿 kW·h，同比减少 62.22%，其中弃风电量为 18.19 亿 kW·h，同比减少 62.48%，弃光电量 0.53 亿 kW·h，同比减少 50.62%；东北全网新能源弃电率 4.73%，同比减少近 10 个百分点。

1.1.4 其他地区清洁能源消纳情况

“十三五”期间，华中、华南及华东地区陆上风电增量将达到 4200 万 kW，海上风电增量将达到 400 万 kW，超过“三北”地区的 3500 万 kW，弃风的情况将更加严峻。

近年来，光伏发电、风电等新能源在广西迅速发展。截至 2018 年 6 月，广西光伏发电装机容量已突破 100 万 kW，达到 100.14 万 kW，同比增长 414.9%；风电装机容量 190.42 万 kW，同比增长 69.71%。2018 年上半年，广西光伏发电量达 3.73 亿 kW·h，同比增长 301.6%，风力发电达 21.07 亿 kW·h，同比增长 95.7%，为电网新能源消纳带来很大压力。

在我国西南地区，水电开发需求逐年增加。“十三五”期间，四川将安装并投入水电机组约 4100 万 kW。预计到 2020 年，四川水电装机容量将达到 116 亿 kW。虽然四川电网等已形成“四交、三通”互联模式，但如果超高压出境通道建设滞后，四川水电出境将面临严重的瓶颈。

抽水储能继续以中国西南河流为开发重点，积极有序推进大型水电基地建设，合理优化和控制中小型盆地的发展，以满足高峰负荷调节和安全稳定的需要。“十三五”期间，我国新建的抽水蓄能电站装机容量约 6000 万 kW，抽水蓄能电站投入运行安装 4000 万 kW。同时，抽水蓄能电站运行管理系统和电价形成机制应进一步合理化。

1.1.5 发展清洁能源供暖的必要性

随着我国社会工业化进程的不断加快，人口大规模向城镇化集中，工业化的发展带动了经济的腾飞，同时也给城市环境带来了极大的压力，甚至破坏。环境问题已成为一个不可避免的问题，限制并严重影响社会发展。

我国北方每年至少有 5 个月的采暖期，煤是主要的热源，冬季煤烟造成严重的空气污染，加之天气条件不利导致空气质量急剧下降。

随着风电、光伏装机容量的不断增长，我国弃风、弃光限电形势逐年加剧。截至 2016 年年底，我国风电装机容量 1.49 亿 kW，约占世界的 1/3，发电量 2100