

Uncertainty Modeling
Theory of Wind Power

风电不确定性 建模理论

于达仁 刘金福 万 杰 郭钰锋 胡清华 著



科学出版社

风电不确定性建模理论

Uncertainty Modeling Theory of Wind Power

于达仁 刘金福 万 杰 郭钰锋 胡清华 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

风电的不确定性——随机性、波动性和间歇性是影响风电安全高效消纳的关键因素。针对上述问题,本书从风的物理本质出发,结合电力系统实时调度与优化控制的需求,对风电不确定性进行研究。主要研究内容如下:①在随机性研究方面:发现风速随机过程满足异方差的非线性随机过程;②在波动性研究方面:发现风速波动过程中存在大尺度波动对小尺度波动的多尺度调制效应以及日照加热对湍动的调制效应;同时引入变差分析对风电的波动速率进行刻画,并对风电波动速率的特性展开研究;③在间歇性研究方面:根据大气边界层湍流间歇性的研究,定义了间歇性刻画指标,实现对风电间歇性的定量刻画;④基于相关分析对风速的可预报性进行分析,发现风速方差、变差及间歇性度量指标具有特定时间尺度的可预报性,扩展了风速的预报参数;⑤在上述不确定性研究的基础上,改进了现有的风速预报模型,并从电能质量评估、电网调频、调度等方面讨论了风电不确定性研究的具体应用。

本书可以作为高等院校新能源发电方向本科生、研究生的教材或者教学参考书,也可供相关科研和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

风电不确定性建模理论=Uncertainty Modeling Theory of Wind Power/
于达仁等著.—北京:科学出版社,2017

ISBN 978-7-03-050760-0

I. ①风… II. ①于… III. ①风力发电-系统建模-研究 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 276312 号

责任编辑:范运年 / 责任校对:张凤琴

责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者工作室

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>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 1 月第一次印刷 印张:15 1/4

字数:291 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

风是一种自然现象。地面各处受太阳辐射不均匀而产生了气压梯度,使得空气从高压处向低压处流动,即形成风。空气流动而产生的动能称为风能。人类利用风能的历史可以追溯到公元前。公元前数世纪风力就被广泛应用于农业生产,用来提水灌溉、磨面舂米。随后出现了以风力为动力的帆船,促进了江河、航海业的发展。到 14 世纪,风车已经成为欧洲不可缺少的原动机。19 世纪,风力开始被用来发电。随后人们逐渐开始研究大规模风力发电。最早商业化的风力发电机出现在 1931 年,位于苏联的克里米亚,容量为 100KW。进入 21 世纪,面对经济迅速增长的能源需求、传统化石能源的日益枯竭以及生态环境的持续恶化,推动以可再生能源利用为核心的能源革命势在必行。而经过近几十年的发展,风电已经成为目前全世界最成熟的可再生能源技术,在全球能源革命中占有重要的战略地位。风电的开发利用迎来前所未有的黄金发展期。

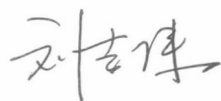
正所谓“风云莫测”,作为一种自然现象,尤其是一种大气湍流现象,风具有高度的复杂多变性,风的变化不以人的主观意愿而改变。因而不同于传统的可控发电方式,风电出力具有强烈的不确定性,包括随机性、波动性和间歇性。大规模风电并网后影响电力系统的安全和经济运行,风电的安全高效利用已经成为当前我国电力系统所面临的重大现实问题。为实现大规模风电的安全高效利用,必须首先掌握风电的变化规律,因此亟需建立满足电力系统分析与控制需求的风电不确定性模型。

哈尔滨工业大学能源、电气学科的研究团队针对大规模新能源电力并网面临的问题与趋势,结合国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目课题“新能源电力系统动力学特性与建模理论(No. 2012CB215201)”,围绕风电不确定性开展了系统的研究工作。本书从大气运动的机理出发,结合电力系统实时调度与优化控制需求,对风电不确定性进行研究,形成了一套风电不确定性建模方法。同时,基于不确定性研究结果,研究风电接入后电力系统的调度方案与控制策略,实现电力系统实际调节能力与需求调节能力在时间上的最佳匹配,确保风电并网后电力系统的安全稳定运行。

2016 年国家已发布“十三五”可再生能源发展规划。与主要推动规模化发展的“十二五”时期相比,有效接纳、传输和利用可再生能源电力,让风光装机切实转变为可利用的电能,实现可再生能源从补充能源向替代能源的转变,是“十三五”期间的重要发展目标。为此国家能源局已经下发了火电运行灵活性改造试点的通

知,全面挖掘燃煤机组调峰潜力,提高电力系统消纳新能源的能力。而在火电弹性运行平抑风电波动的过程中,对风电特性及预报的掌握是不可或缺的。本书系统地建立了风电不确定性量化模型,发展了考虑不确定性的风速预报方法,为电力系统运行控制中合理应对风电不确定性提供了模型支持。

一书总结了作者最新的研究成果,既有理论深度,也展望了应用前景,体现了学科交叉与融合的特点。该书可供新能源领域科技工作者、以及高等院校相关专业师生使用和参考。希望本书的出版对大规模风电的安全高效利用起到积极作用。



2016年7月

前 言

能源是人类社会进步与经济发展的重要物质基础。自工业革命以来,全世界能源消耗急剧增加,以煤炭、石油、天然气为代表的化石燃料被迅速消耗。化石能源的枯竭将严重制约着人类社会的发展,同时,化石能源燃烧所带来的环境污染问题也日益突出。能源问题和环境问题已经成为人类面临的重大挑战之一。为了缓解上述问题,大规模开发利用清洁可再生的新能源已成为世界各国可持续发展的重要战略决策。风能由于其环境友好、储量丰富的优势被认为是目前最具有开发潜力和竞争优势的新能源。根据全球风能理事会统计,2015 年全球风电新增装机 63013MW,同比增长 22%。截止 2015 年年底,全球风电累计装机容量达到 432419MW,累计同比增长 17%。其中中国 2015 年风电新增装机 30500MW,占全球新增装机容量的 48.4%;累计装机容量 145104MW,占全球累计装机容量的 33.6%。

然而,在中国,随着风电的迅速发展及其在电网中所占比例的日益上升,一些问题也凸显出来,如并网难、装机多而发电少、弃风比例高等。风电的高效消纳已经成为我国大规模发展风电所面对的重大现实问题。造成上述问题的主要原因在于同传统发电方式相比,风电具有强烈的不确定性,包括随机性、波动性及间歇性。当大规模风电并网后,对电网的潮流分布、调度方式、电网稳定、无功补偿和电网调峰调频等带来重大影响。为了有效缓解风电接入带来的问题,迫切需要掌握风电的不确定性。本书从风的物理本质出发,结合电力系统实时调度与优化控制的需求,对风电不确定性进行研究,形成了一套风电不确定性建模方法。同时基于不确定性研究结果,研究风电接入后电力系统的调度方案与控制策略,实现电力系统实际调节能力与需求调节能力在时间上的最佳匹配,确保风电并网后电力系统的稳定安全运行。

本书共十章,主要内容安排如下:第 1 章主要介绍目前风电的发展情况、风电预报及风电特性的研究现状以及风速的非平稳随机过程;第 2 章主要介绍风的物理本质及相关的物理背景;第 3 章主要介绍风电方差的建模过程及研究结果,实现对风电功率波动范围的刻画;第 4 章引入变差分析工具,介绍风电变差的建模过程及研究结果,实现对风电功率波动速率的刻画;第 5 章对风电的频谱特性进行研究;第 6 章从湍流间歇性的角度出发,定义了风速间歇性及其定量刻画参数,实现对风电间歇性的定量刻画;第 7 章介绍了风速的日周期特性,包括方差的日周期、变差的日周期、间歇性刻画参量的日周期,并对日周期特性的物理机制和应用进行

了探讨;第8章引入相关分析的方法,对风速、风速方差、风速变差及间歇性刻画参数的可预报性进行度量,扩展了风速的可预报参数;第9章在可预报性分析及不确定研究的基础上,建立相应的预报模型,结合风电场实际数据进行预报;第10章基于风电不确定性的研究结果,从电能质量评估、电网调频、调度及一体化平抑的角度出发探讨了风电不确定性研究的应用。

本书第1章、第3章、第5章、第7章和第8章由于达仁教授、刘金福副教授和万杰博士执笔,第2章、第4章和第6章由于达仁教授和任国瑞博士执笔,第9章由胡清华教授和万杰博士执笔,第10章由郭钰锋副教授和王琦博士执笔。全书由于达仁教授统稿。实验室和团队的胡清华教授、刘金福副教授、郭钰锋副教授、万杰博士、任国瑞博士、王琦博士、赵鑫宇博士和已经毕业的苏鹏宇等,直接参与了本书内容相关的研究工作。正是他们的潜心研究完善了风电不确定性的建模理论。本书的一些内容直接引用了他们的研究成果和相关论文,在此对本书做出贡献的各位老师和同学表示衷心的感谢! 特别感谢刘吉臻院士为本书作序,感谢他对本书研究工作的指导与支持!

本书引用了大量的参考文献,在此谨向被引文献的作者致以诚挚的谢意!

本书得到了国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“智能电网中大规模新能源电力安全高效利用基础研究”(编号:2012CB21500)的资助,特此致谢!

限于作者的知识面和撰写时间,书中难免存在疏漏和不足之处,恳请专家和广大读者批评指正。

作 者

2016年6月于哈尔滨工业大学

目 录

序

前言

第 1 章 概论	1
1.1 概述	1
1.2 大规模风电并网的关键基础问题	5
1.2.1 大规模风电并网影响研究	8
1.2.2 风电预报研究	10
1.2.3 风电特性的研究	20
1.3 风电不确定性建模的必要性	25
1.4 风速的非平稳随机过程	26
参考文献	29
第 2 章 风的物理本质认识	37
2.1 引言	37
2.2 大气边界层运动	37
2.2.1 气压梯度力	37
2.2.2 摩擦力	38
2.2.3 科里奥利力	39
2.2.4 离心力	40
2.3 大气边界层的基本特点	40
2.3.1 大气边界层的垂直分层	40
2.3.2 大气边界层的湍流性	41
2.3.3 大气边界层的日变化	42
2.4 湍流	43
2.4.1 湍流现象与雷诺实验	43
2.4.2 湍流的四个重要概念	44
2.4.3 大气湍流的基本特性	45
2.4.4 大气湍流的产生和维持	47
2.4.5 大气湍流的研究方法	48
2.4.6 局地均匀各向同性理论与动能串级输送	49
2.4.7 湍流的间歇性	52

2.5 本章小结	54
参考文献	55
第3章 风电方差建模	57
3.1 引言	57
3.2 风速方差	58
3.2.1 风速方差的定义	58
3.2.2 传统方差计算方法的局限性	58
3.2.3 基于小波算法的风速瞬时方差计算方法	59
3.3 风速方差的多尺度调幅效应研究	65
3.3.1 风场实测风速的方差计算	65
3.3.2 风速方差的调幅效应	67
3.3.3 调幅效应的多尺度特性	70
3.4 风速方差的定量刻画模型	72
3.5 风功率方差不确定性建模	76
3.5.1 风功率的调幅效应	76
3.5.2 风功率调幅效应的多尺度特性	77
3.6 风电方差多尺度调幅效应的物理机制	80
3.7 本章小结	80
参考文献	80
第4章 风电变差建模	82
4.1 引言	82
4.2 变差分析方法	83
4.3 风速变差分析	84
4.3.1 风速变差	85
4.3.2 风速变化率的定量刻画模型	86
4.4 风功率变差不确定性模型	89
4.4.1 风功率变差的调制效应	89
4.4.2 风功率变差的定量刻画模型	90
4.5 本章小结	91
参考文献	92
第5章 风电频谱特性研究	93
5.1 引言	93
5.2 风速瞬时频谱模型	93
5.3 风速的多尺度调频效应研究	95
5.3.1 风速的调频效应	95

5.3.2 调频效应的多尺度特性	97
5.4 风功率功率谱	98
5.5 场群瞬时功率谱特性研究	99
5.5.1 风电功率的功率谱估计实例分析	99
5.5.2 风电功率的汇聚效应	101
5.6 物理机制分析	102
5.7 本章小结	103
参考文献	103
第6章 风电间歇性研究及定量刻画	105
6.1 引言	105
6.2 风速间歇性定义	105
6.3 风速间歇性定量研究	106
6.3.1 风速陡变占空比	106
6.3.2 统计参数特性分析	110
6.3.3 风功率陡变占空比	115
6.4 风机启停频度的定量研究	116
6.5 本章小结	123
参考文献	123
第7章 风速日周期特性研究	124
7.1 引言	124
7.2 时间序列的周期性分析方法	124
7.3 风速方差的周期特性研究	125
7.3.1 风速方差日周期特性	125
7.3.2 不同因素对风速方差日周期特性的影响	133
7.3.3 时变建模方法消除日周期特性的影响	136
7.4 风速变差的日周期特性研究	138
7.5 风速陡变占空比的日周期特性	142
7.6 日周期的物理机制分析及应用探讨	143
7.6.1 日周期特性的物理机制分析	143
7.6.2 日周期对风电安全高效应用的意义分析	144
7.7 本章小结	144
参考文献	144
第8章 风速可预报性分析研究	145
8.1 引言	145
8.2 可预报性度量	146

8.2.1 基于自相关的可预报性度量	146
8.2.2 基于互相关的可预报性度量	146
8.3 小时级平均风速可预报性分析	147
8.4 方差可预报性分析	150
8.5 变差可预报性分析	151
8.6 风速陡变占空比可预报性分析	152
8.7 风速预报参数的扩展	154
8.8 本章小结	154
参考文献	154
第9章 基于历史数据的预报模型建模	156
9.1 引言	156
9.2 平均风速多尺度预报模型	156
9.2.1 现有多尺度预报模型	156
9.2.2 预报模型的构建	157
9.2.3 支持向量回归和核岭回归	157
9.2.4 预报算例及结果分析	161
9.3 异方差特性建模	167
9.3.1 基础知识	167
9.3.2 异方差噪声特性的 ν -支持向量回归模型	168
9.3.3 预报算例及结果分析	173
9.4 风速其他要素预报算例	175
9.4.1 深度学习预报模型	175
9.4.2 方差预报算例及结果分析	186
9.4.3 变差预报算例及结果分析	187
9.4.4 陡变占空比预报算例及结果分析	189
9.5 本章小结	191
参考文献	191
第10章 风电不确定性模型的应用	193
10.1 引言	193
10.2 电能质量评估	193
10.3 计及风电功率波动的电网调频能力评估	195
10.3.1 计及秒级风电功率波动的电网一次调频能力	197
10.3.2 计及分钟级风电功率波动的电网二次调频能力	201
10.3.3 计及风电功率波动的电网调频能力量化评估可行性分析	202
10.4 D_{PFRA} 和 D_{SFRA} 在风电大规模并网电力系统中的应用	204

10.4.1	不同因素对 D_{PFRA} 和 D_{SFRA} 的影响	204
10.4.2	D_{PFRA} 和 D_{SFRA} 的具体应用方法	206
10.4.3	算例分析	207
10.5	控制策略研究	213
10.5.1	动态一次调频控制策略	213
10.5.2	结合实测风场功率输出的二次调频前馈控制	218
10.5.3	两种控制策略的协调配合	222
10.6	电力系统调度中的应用	223
10.7	多能源互补及一体化平抑策略	224
10.7.1	风电的多元互补策略	224
10.7.2	一体化平抑控制策略	225
10.8	本章小结	230
	参考文献	230

第 1 章 概 论

1.1 概 述

面对化石能源日益枯竭、环境污染、气候变化等人类共同的难题,大力开发利用风能、太阳能、生物质能等新能源,提升传统能源利用效率、节能减排、发展智能电网,已成为世界各国的基本共识^[1]。风能是所有可再生能源中最具规模化开发前景的新能源。图 1-1 和图 1-2 所示为中国风能协会对全世界截至 2015 年 12 月 31 日的风电装机容量统计情况。以德国为例,2015 年德国累计的已并网海上风电总装机容量达到 3294.9MW,较 2014 年增长了 225%。并且,还有 956MW 正处于建设之中^[2]。按照现有政策,到 2017 年底,德国最多可为在 2020 年完成吊装的海上风电项目分配 7700MW 的限额,如图 1-3 所示。此外风力发电设备的制造技术也日益成熟,2015 年首次并网的海上风电机组的平均单机容量为 4145kW,平均风轮直径为 119.7m,平均轮毂高度为 88.5m,平均单机容量则提高了 9.5%。据北极星风力发电网报道,世界上十大风机之一是德国 Enercon 风电公司旗下的

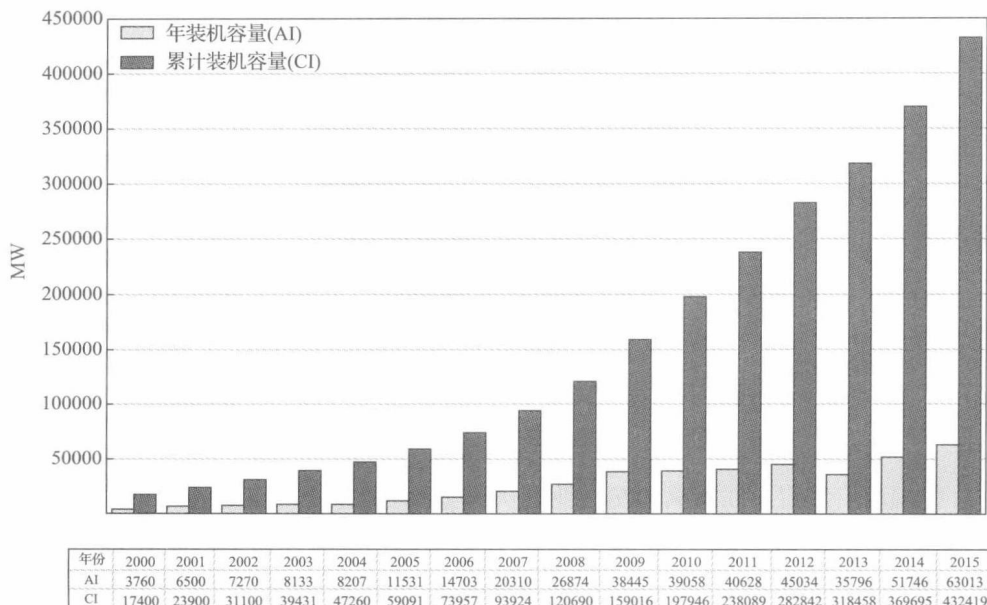


图 1-1 近十五年全世界风电发展概况

E-126 产品,机组塔架高度为 135m,风轮直径为 126m,总高可达 198m,风机总重 6000t,这个巨无霸可产生 7.5MW 的电力。

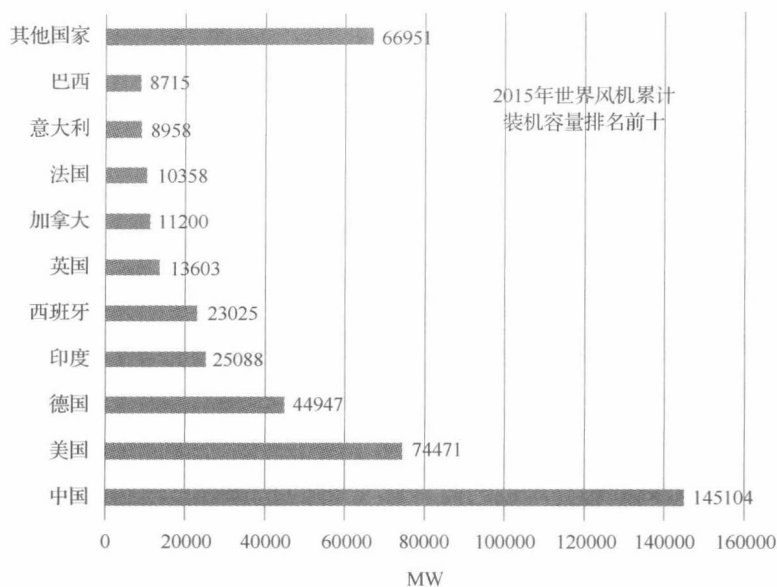


图 1-2 装机容量排名前十国家(2015 年)

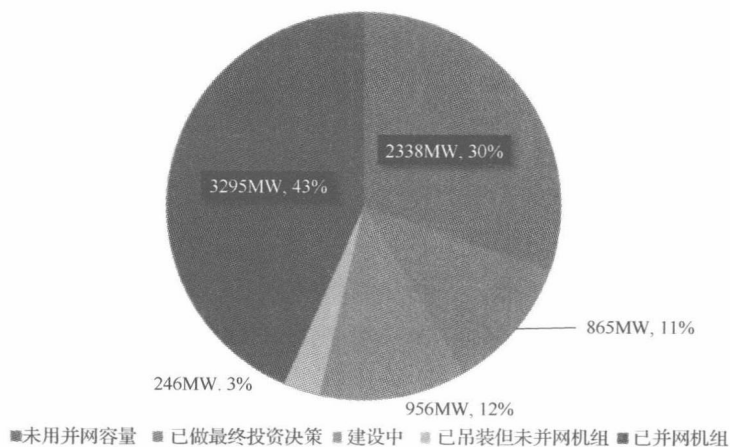


图 1-3 德国 2015 年海上风电发展概况

我国政府制定了发展新能源产业的国家战略,并作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划中。近十年来,中国的风电装机容量呈现指数型增长,如图 1-4 所示。2016 年 3 月 3 日,国家能源局发布《关于建立可再生能源开发利用目标引导制度的指导意见》,首次明确了 2020 年各省(区、市)能源消费总量中的可再

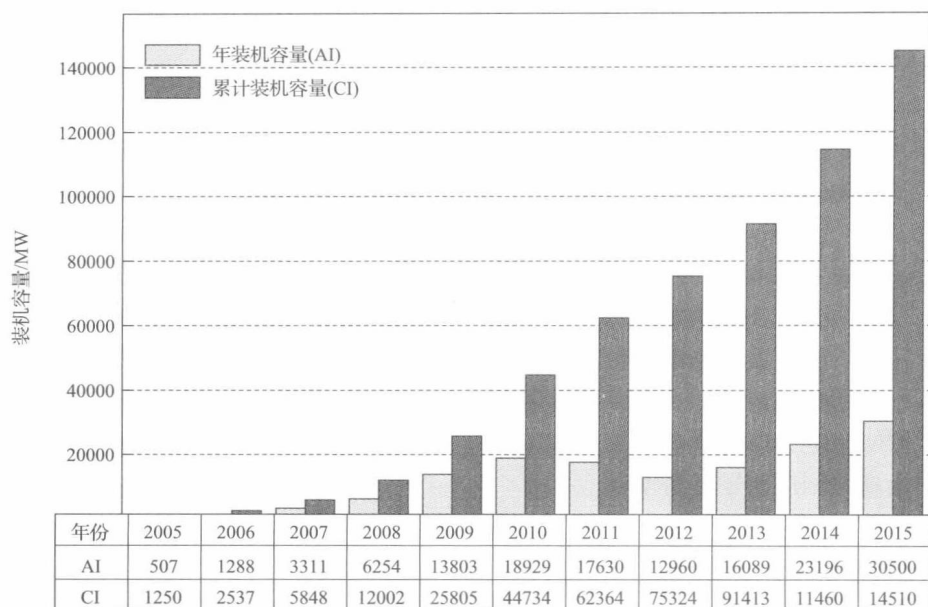


图 1-4 中国近十年的风电发展概况

生能源比重目标在 5% 到 13% 之间,而全社会用电量中的非水电可再生能源电量比重指标为 9%。预计未来风电装机容量年增长率还将会继续增长。《国家电网公司促进新能源发展白皮书(2016)》指出:在“十三五”期间加大新能源项目配套电网投资,加快工程建设,尽最大努力保障 2020 年前年均新增风电 2500 万千瓦、光伏发电 2000 万千瓦装机的并网和送出。根据《白皮书》的数据显示,2015 年,国家电网调度范围风电、太阳能发电新增装机容量发电量分别为 1661 亿千瓦时、377 亿千瓦时,国家电网已成全球范围内接入新能源规模最大的电网。泛珠三角区域合作指导意见也相继指出了积极开发风能等新能源的战略:“大力发展新能源和可再生能源,稳妥推进已经列入相关规划的核电项目建设,积极开发风能、太阳能、生物质能、海洋能等新能源,完善区域电源点布局,推广多能互补的分布式能源”。此外,我国电力装备及技术发展迅速,新能源技术实力进一步提升,目前风电等新能源装备出口比重接近 7%,如图 1-5 所示。

规模化新能源电力的安全高效开

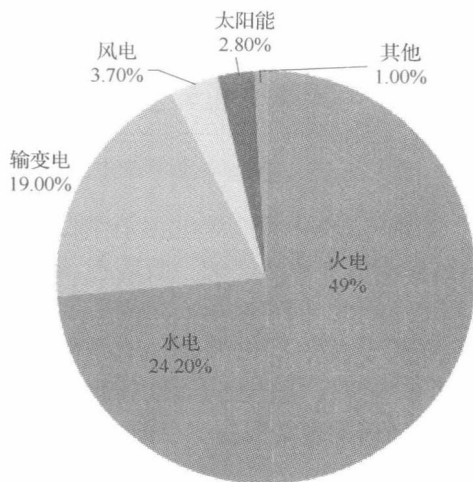


图 1-5 我国电力装备出口状况

发利用是我国全面建设小康社会、实现可持续发展的必然选择,是调整产业结构、加快经济发展方式转变的重大举措,是构建我国科技竞争新优势、掌握新兴产业发展主动权的难得机遇^[3]。未来新能源电力必将由补充能源发展为替代能源,并最终成为主流能源。北极星电力网公布数据显示:发展清洁能源已成为全球共识,全球能源互联网未来矩阵可分国内互联、周内互联和洲际互联三个阶段实施,全面解决世界能源安全、环境污染和温室气体排放等问题。国家电网公司分析了构建全球能源互联网以清洁和绿色的方式满足全球电力的需求,预计,到 2050 年清洁能源比重将达到 80%,节能减排效果巨大^[4]。然而,随着风电并网规模的扩大,风电不确定性对电力系统与电力市场的稳定性、充裕性及经济性的影响也日益彰显,弃风限电问题日趋严重^[5]。在目前电源结构下,弃风比例已逾一成,如图 1-6 所示;随着新能源电力的规模化发展,“弃风”现象将更加凸显。因此,规模化新能源电力的安全高效利用问题亟待解决。

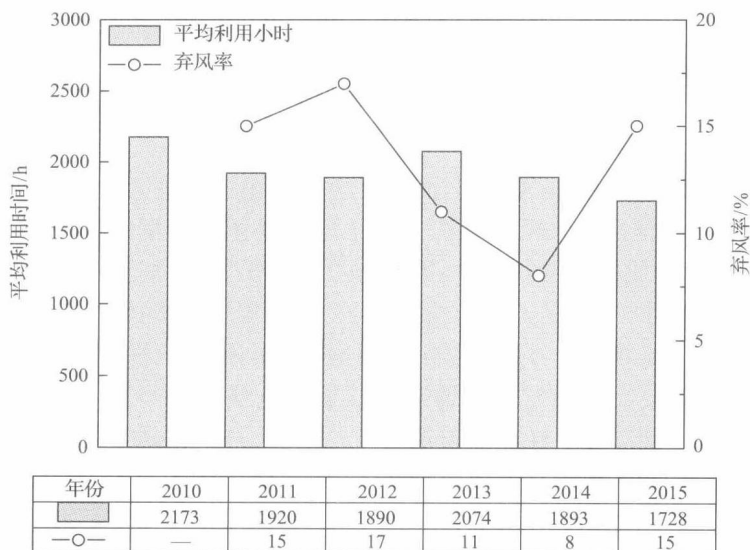


图 1-6 近年来中国的风电平均利用小时数及弃风率

当前,规模化新能源电力消纳已成为我国电力系统面临的重大现实问题^[3]。并且,随着风电渗透率的不断提高,规模化新能源电力消纳面临的问题和矛盾将更加突出。因此,国家能源局相继出台了系列新能源发展指导和支持政策,如《国家能源局关于做好 2016 年度风电消纳工作有关要求的通知》和国家发改委印发的《可再生能源发电全额保障性收购管理办法》等。大规模风电的安全高效利用是一个无法回避的现实问题。目前,我国大规模新能源电力消纳的制约瓶颈有以下两点:①电源结构性矛盾突出,匮乏可平抑新能源电力随机波动特性的电源。②开发成本高,利用率低,缺乏实现全局优化的理论体系^[1,3]。

实际上,以风电为代表的新能源电力,其本质特征是空间尺度的分散性与时间尺度的随机波动不确定性。并且,风能等新能源电源的随机不确定性随季节、气候、局部气象、地理条件等因素的变化而不同。因此,研究风电不确定性等新能源电源的内在特性,发展与之相适应的建模理论与方法,对新能源电力系统的安全经济运行具有非常重要的意义。

1.2 大规模风电并网的关键基础问题

风能等新能源电源的强随机不确定性通过电网与电力系统相互作用,使系统运行条件和运行特性更加复杂。因此,新能源电力系统的安全高效运行相关的基础研究成为热点。下面从文献计量学的角度分析风电相关的研究现状。

在 Web of Science 平台上,以“wind power”为主题检索相关文献,截止到2016年3月能够检索到文献23万多篇。在此基础上,限定标题中含有“integration”后进一步精炼后得到4500多篇文献,引文报告如图1-7所示。若是以标题搜索“wind speed” or “wind power” & “prediction” or “forecasting”可以得到120万多篇文献,利用“wind farm”进一步精简可以得到20多万篇文献,由于文献过多无法创建引文报告。若是以标题搜索“wind speed” or “wind power” & “uncertainty characteristic”可以得到14万多篇文献,利用“wind farm”进一步精简可以得到3800多篇文献,引文报告如图1-8所示。在一定程度上可以看出:全世界相关研究在2005年之后发展较为迅速,2012年后有大幅提高。

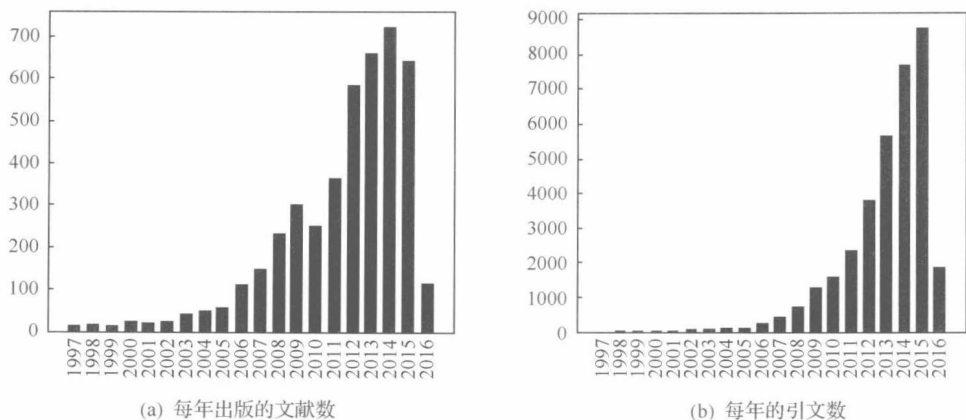


图 1-7 以“wind speed or power”和“uncertainty characteristic”为主题的引文报告

在“中文学术资源发现平台”上,以主题“风电”检索相关文献,截止到2016年3月,能够检索到8万多篇文献,包括期刊、学位论文、会议论文、专利、标准、报纸和科技成果。在此基础上,限定标题中含有“并网”后进一步精炼后得到1万多篇