

“十三五”国家重点出版物出版规划项目


风能技术与应用丛书 丛书主编 姚兴佳

风电场工程

Wind Farm Project

姚兴佳 单光坤 刘颖明 刘姝 马铁强/著

 科学出版社



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

风能技术与应用丛书 丛书主编 姚兴佳

风电场工程

姚兴佳 单光坤 刘颖明 刘 姝 马铁强 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对现代风电场开发建设的需要,采用理论与工程实例结合、注重工程应用的原则撰写而成。通过剖析代表性风电场,把新一代风电场工程建设的全过程推介给广大读者,向读者展示风电场工程技术的全貌、发展趋势和最新研究成果。全书共八章,内容涵盖陆上风电场设计、建设,风电场的经济分析和运行维护,智慧风电技术和储能技术。

本书适合风电场开发专业技术人员和运行管理人员自学与参考,可作为高等学校新能源与动力工程相关专业本科生和研究生的教学参考书,对广大风电爱好者也有一定的阅读和参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

风电场工程 / 姚兴佳等著. —北京: 科学出版社, 2019.5

(风能技术与应用丛书 / 姚兴佳主编)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-060993-9

I. ①风… II. ①姚… III. ①风力发电—发电厂—电力工程
IV. ①TM62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 067093 号

责任编辑: 任彦斌 张 震 / 责任校对: 王萌萌

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 无极书装

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 5 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2019 年 5 月第一次印刷 印张: 16 1/2

字数: 310 000

定价: 99.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

“风能技术与应用丛书”编委会

主 编：姚兴佳

副主编：刘颖明 马铁强 单光坤 王晓东

夏加宽 李建林 杜 涛 杨东升

编 委：段振云 井艳军 李 科 李丽霞

梁立哲 刘 姝 刘鑫蕊 卢爽瑄

孙传宗 隋红霞 宋筱文 邵一川

王 超 王益全 王英博 谢洪放

张纯明 赵 骞

丛书前言

2016年初,中国可再生能源学会副理事长、中国可再生能源学会风能专业委员会主任姚兴佳与科学出版社策划编辑、东北大学副编审任彦斌共同策划“风能技术与应用丛书”,申报并成功入选“十三五”国家重点出版物出版规划项目(立项文号:新广出发【2016】33号)。经过写作团队三年不懈的努力,“风能技术与应用丛书”终于和风电业界同仁及广大读者朋友见面了。这套丛书的出版发行,实现了沈阳工业大学风能技术研究所及其合作伙伴多年的夙愿,犹如在他们辛勤耕耘的风能领域绽放了一束绚丽的科技之花。

这套丛书主要是基于国家科技攻关计划、863计划、国家科技支撑计划项目等科研成果,由姚兴佳教授主持撰写而成的。早在20世纪80年代,由姚兴佳教授创建并带领的研发团队就在黄海之滨建立了辽宁省大鹿岛风力发电试验场,开展了分布式风力发电系统设计和应用的研究,其中15kW微机控制变桨距风电机组获得辽宁省科学技术进步奖二等奖;进入90年代,开始转向并网型风电机组关键技术开发及小规模推广应用的研究,和辽宁省电力公司联合完成的“辽宁东港风电场开发与建设”项目获得辽宁省科学技术进步奖一等奖;2001年以来,先后完成863计划“兆瓦级变速恒频风电机组”“兆瓦级变速恒频风电机组II型设计与制造”“兆瓦级变速恒频风电机组-测试系统与现场试验研究”“兆瓦级物理储能关键技术研究”“风电机组设计技术及工具软件开发”和国家科技支撑计划“适应海陆环境的双馈式变速恒频风电机组研制”等国家级重点项目,初步建立了具有完全自主知识产权的风力发电理论基础和技术体系,取得多项创新特征突出的标志性成果,其中,“兆瓦级变速恒频风电机组”项目获得国家科学技术进步奖二等奖,“大功率风电机组研制与示范”项目获得中国机械工业科学技术进步奖特等奖,“环境适应型系列风电机组”等2项成果获得辽宁省科学技术进步奖一等奖。在多年科技开发实践的基础上,姚兴佳研发团队获批“兆瓦级变速恒频风电机组”等发明专利12项、“HR风电机组设计软件”等软件著作权7项,主持编写《风力发电机组变桨距系统》(GB/T 32077—2015)等国家标准4部,发表学术论文200余篇,著有《风力发电机组理论与设计》等专业著作6部;构建了“风力发电重点实验室”“风力发电工程技术研究中心”和“风力发电培训基地”三大基础平台,为实现我国风电技术从引进到创新、从千瓦级到兆瓦级、从陆上到海上的跨越式发展做出了贡献。到目前为止,由团队设计的1.0~5.0MW等多种型号的系列风电机组,

在国内外 60 余座风电场得到大面积推广应用，团队所在研究所被科技部命名为“国家技术转移示范机构”，取得了显著的经济效益与社会效益。同时，团队也为新能源行业输送、培养了大批风电科技人才。这套丛书可以说是作者及其研发团队在风电理论研究和技术开发领域全面总结的结晶，其目的是通过丛书的出版发行对我国风力发电健康、科学地发展提供借鉴。

丛书共 7 册：《风电场工程》《大型风力发电机组原理、设计与测试》《分布式风力发电系统原理与设计》《海上风力发电技术》《大功率风力发电机组控制技术》《风电场电气技术及应用》《风力发电场安全运行工程技术》。丛书系统地介绍风能基本理论、风力发电技术、典型工程应用案例；大型风电机组设计及运行控制技术；中小型风电机组原理、设计与测试；风电机组检测、认证和运行监测；海、陆风电场的设计与建设；储能原理及其在风电调控方面的应用；风电场安全运行工程技术等。为了形成独立、完整、统一的知识体系，丛书并未按学科和专业进行分块化描述，而是面向典型工程问题或工程环节，主线分明地抓住各个典型工程之间的内在联系，综合运用多学科交叉知识，将理论分析、仿真分析、实验验证、工程实例融汇到每个细节，系统地给出相关问题的理论依据、研究方法和解决方案，力争做到理论与实际的高度融合。丛书立足于推动风电的科技进步，在相关内容中采用了风能领域的最新科研成果，其中不乏一些新理论、新方法、新技术的介绍和应用案例。丛书旨在为读者提供掌握风力发电技术整体构架的知识平台，希望能对广大读者全面了解风能行业及相关技术有所帮助。

丛书的撰写得到沈阳工业大学及相关合作单位专家学者和科研人员的大力支持，丛书还借鉴了国内外许多学者有关风能开发应用的论著，在此对他们一并表示感谢！

丛书撰写过程时间跨度大、参与人员多，加之题材广泛、学科背景交叉繁杂，疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

“风能技术与应用丛书”编委会

2018年6月

前 言

在积极迎接经济发展新常态的大背景下，能源转型已成为我国能源发展的主旋律，其主流方向是实现以风电为主的可再生能源的高比例替代。从全球风电装机容量绝对值的角度看，我国堪称世界风电第一大国，但从风电在电源结构中占有的比例来看，我国还不是真正意义上的风电强国。中国风电上网电量占总发电量的比例逐年增加，2016年风电上网电量为2410亿kW·h，占总发电量的比例达4.08%，超越核电（3.56%）和光伏（1.12%），成为我国第一大新能源发电形式。欧洲风能协会数据显示，2018年1月3日当天风电占欧洲电力结构比例达到22.7%。由此可见，我国风电发展水平与欧洲的风电强国还有较大差距，其差距的主要标志体现在核心技术的掌握程度上。除此以外，我国风电产业也为惊人增长速度付出了代价，风资源与负荷中心错配矛盾加剧，弃风限电愈演愈烈，并网消纳步履维艰，把种种现象的内在因素联系起来分析，除了需要国家政策助推电力结构供给侧改革问题，所有问题在很大程度上都集中于风电场核心技术研发水平这样一个焦点上。

本书正是在这样的形势需求下应运而生的。本书有机地综合了气象学、地质学、空气动力学、材料科学、机械工程、电气工程、环境工程等多学科交叉知识，通过重点剖析代表性风电场和典型机型，由点到面、深入浅出地把新一代风电场工程建设的全过程推介给广大读者，向读者展示了风电场工程技术的全貌、发展趋势和最新研究成果。全书共8章。第1章介绍风电市场的现状及发展趋势；第2章阐述风能资源评估及风电场设计，包括风能跟踪与捕获、风电场的宏观选址、微观选址与风电场发电量计算等内容；第3章介绍陆上风电场建设，包括勘测设计、基础施工、运输吊装及配套设施等内容；第4章介绍风电场前期电气工程建设，包括电气接入系统设计、设备选型、安全措施及电气系统施工等内容；第5章介绍风电场经济分析，包括财务效益、偿还能力评估及盈利指标计算等内容；第6章介绍风电场运行及维护，包括运维规范、故障处理、可靠性技术及基于大数据分析的智能状态监测等内容；第7章介绍智慧风电技术；第8章介绍储能技术，包括化学储能、物理储能以及利用风能制热、制氢等技术解决风电场“弃风限电”难题等内容。通过陆上风电场规划、建设的具体应用实例帮助读者深入理解书稿的内容。本书的突出特点是注重技术应用，书中涉及的许多技术观点具有前瞻性和独创性，有利于启发与激励读者在风能开发应用领域的研究和创新热情。

本书的完成得益于作者多年风电研发经验的积累和大量科技成果的支撑。写作团队的主要成员先后参加了辽宁省大鹿岛风力发电试验场、辽宁省东岗风电场和内蒙古自治区正镶白旗风电场等多个风电场的开发建设，在现场勘测、规划设计、工程建设、运行管理等方面积累了丰富的经验。20世纪80年代，由姚兴佳教授创建并带领的研发团队在辽宁省大鹿岛建立的风力发电试验场，就成为全国四大风力发电试验场之一；“辽宁省东岗风电场开发与建设”项目于2001年获得辽宁省科学技术进步奖一等奖；2001年以来，姚兴佳研发团队先后承担并完成了多项国家高技术研究发展计划（863计划）和国家科技支撑计划重大专项等科研课题，并获得国家科学技术进步奖二等奖、国家机械工业科学技术奖特等奖及辽宁省科学技术进步奖一等奖等政府奖励，出版专业著作6部，执笔编写国家标准4部，发表学术论文200余篇，取得了大量具有自主知识产权的科研成果。

本书由姚兴佳教授主持撰写，主要内容由姚兴佳、单光坤执笔。参加撰写工作的还有刘颖明、刘姝、马铁强。另外，王晓东、宋筱文、李广博、姚航、张哲、陈亮、谢洪放也参与了本书的数据、资料搜集、整理工作。全书由姚兴佳教授审阅并定稿。

本书在撰写过程中得到了中国可再生能源行业协会、中国动力工程学会新能源设备专业委员会、国家稀土永磁电机工程技术研究中心、大唐集团华创风能有限公司、沈阳华人风电科技有限公司、沈阳工业大学风能技术研究所、中国能源建设集团辽宁电力勘测设计院有限公司和沈阳标准化研究院等单位的大力支持，在此一并表示衷心感谢。

本书在编写过程中所参考的主要著作和论文已列入书后的参考文献供读者查阅，同时向相关文献的作者表示谢意。由于风电场工程技术涉及知识面广，发展速度快，作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

作者

2018年3月

目 录

丛书前言

前言

第 1 章 风电市场的现状及发展趋势	1
1.1 全球风电市场现状及发展趋势	1
1.2 国内风电市场现状及发展趋势	3
第 2 章 风能资源评估及风电场设计	7
2.1 风能资源	7
2.2 风能资源评估	8
2.2.1 风能资源评估方法	8
2.2.2 风能资源评估软件	9
2.2.3 风能资源评估工作	11
2.2.4 评估的风能资源参数	12
2.3 风电场的宏观选址	13
2.3.1 影响风电场宏观选址的主要因素	13
2.3.2 风电场宏观选址的基本原则	14
2.3.3 风电场宏观选址的流程	15
2.4 风电机组的选型	16
2.4.1 单机容量的选择	16
2.4.2 风电机型的选择	17
2.4.3 风电机组选型的步骤	19
2.4.4 影响风电机组选型的因素	19
2.5 风电场发电量计算	21
2.5.1 风电场发电量计算方法	21
2.5.2 上网电量估算	22
2.6 风电场的微观选址	23
2.6.1 风电机组布局的影响因素	24
2.6.2 微观选址原则	25
2.6.3 微观选址的主要方法步骤	26
2.6.4 风电场常见的布机方式	27

2.6.5	风电场微观选址过程中存在的问题	29
2.7	工程实例	30
2.7.1	风能资源	30
2.7.2	风电机组选型	32
2.7.3	不同机型发电量估算	34
2.7.4	不同机型综合经济比较	38
2.7.5	机型选择及风电场总体布置	39
第3章	陆上风电场建设	42
3.1	风电场建设前期工作	42
3.1.1	前期工作内容	42
3.1.2	风电场前期工作的流程	43
3.1.3	前期工作管理	43
3.2	风电场工程招标	45
3.3	风电场施工	46
3.3.1	风电机组基础的施工	46
3.3.2	风电机组主要部件的包装、运输、储存及吊装	47
3.3.3	风电机组的安装	57
3.3.4	风电机组的调试与验收	68
3.4	风电场工程后评估	72
3.4.1	投资项目后评估国内外发展概况	73
3.4.2	风电场工程后评估的内容、意义和方法	74
3.5	工程实例	78
3.5.1	工程条件	78
3.5.2	施工总体布置	81
3.5.3	施工交通运输	82
3.5.4	工程征地	84
3.5.5	主体工程施工	85
3.5.6	施工总进度	93
第4章	风电场前期电气工程建设	95
4.1	风电场接入系统	95
4.1.1	风电场接入系统设计的要求	95
4.1.2	风电场接入系统工程可行性研究报告	96
4.2	风电场电气设计与主要设备选择	99
4.2.1	风电场电气主接线	100
4.2.2	主要电气设备的选择	102

4.2.3 电气二次系统设计与选择	106
4.3 风电场电气系统施工	113
4.4 工程实例	117
4.4.1 电气一次系统	117
4.4.2 电气二次系统	124
第5章 风电场经济分析	131
5.1 概述	131
5.2 财务效益与费用估算	135
5.3 风电场项目盈利能力与偿还能力	142
5.4 工程实例	148
5.4.1 工程设计概算编制说明	148
5.4.2 概算表	151
第6章 风电场运行及维护	155
6.1 概述	155
6.2 风电场运行工作	155
6.2.1 风电场运行工作主要内容	155
6.2.2 风电场运行方式	155
6.2.3 风电场运行要求	160
6.2.4 风电场设备异常运行与故障处理	161
6.2.5 风电场运行分析	162
6.3 风电场维护工作	162
6.3.1 风电场检修项目及其主要内容	162
6.3.2 维护方式	163
6.3.3 风力发电场检修要求	165
6.4 风电场运行和维修管理	165
6.4.1 检修管理工作的主要内容	166
6.4.2 检修管理工作的要求	167
6.5 基于大数据分析的风电机组可靠性维护	168
6.5.1 风电机组故障及可靠性维护	169
6.5.2 基于大数据分析的风电机组智能状态监测	171
第7章 智慧风电技术	176
7.1 风电技术发展方向	176
7.2 智慧风电场	183
第8章 储能技术	187
8.1 我国风电发展面临的问题	187

8.2 储能技术在电力领域中的发展	189
8.3 储能技术在风力发电中的应用	193
8.4 抽水储能	198
8.5 压缩空气储能	204
8.6 飞轮储能	212
8.7 化学电池储能	219
8.8 超导储能	236
8.9 超级电容储能	240
参考文献	250

第 1 章 风电市场的现状及发展趋势

1.1 全球风电市场现状及发展趋势

1. 国外风电装机容量现状

根据全球风能理事会 2018 年 2 月发布的《全球风电市场年度统计报告》，2017 年全球新增装机容量 52.573GW，累计装机容量达到 539.581GW。其中北美地区风电累计装机容量 105.321GW，拉丁美洲和加勒比地区风电累计装机容量 17.891GW，欧洲地区风电累计装机容量 169.319GW，亚太地区风电累计装机容量 233.735GW，非洲和中东地区风电累计装机容量 4.538GW。2017 年，中国风电新增装机容量同比下降，初步统计中国新增装机容量 19.5GW；印度实现了强劲增长，巴基斯坦、泰国、越南等国都有显著的增长；欧洲风电实现创纪录增长，其中德国新增装机容量超过 6GW；美国市场以 7.1GW 装机容量再次经历了强劲增长的一年；在拉丁美洲，巴西风电装机容量实现了 2GW 增长^[1]。

2. 全球风电市场分析

(1) 国外风电市场空间。风电场建设成本由风力发电机组（以下简称风电机组）、基础与建筑、电力工程、安装费用等构成，其中机组成本占风电场建设成本的 70%。

按照 8000 元/kW 的建设成本对全球风电场进行市场空间测算。2020 年全球风电市场空间将达到 6376 亿元，海外风电市场空间将达到 5736 亿元，具体见表 1.1 和表 1.2。

表 1.1 全球风电市场空间

单位：亿元

项目	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
全球风电市场空间	5440	5760	6056	6376
风电整机市场空间	3808	4032	4239	4463
叶片市场空间	887	939	988	1040
塔架市场空间	720	762	801	844
齿轮箱市场空间	617	653	687	723
变流器箱市场空间	278	294	309	326

续表

项目	2017年	2018年	2019年	2020年
控制器市场空间	190	202	212	223
变桨系统市场空间	149	157	165	174
变压器市场空间	137	145	152	160
发电机市场空间	129	137	144	152
主轴市场空间	107	113	119	125
轴承市场空间	46	49	52	5

表 1.2 海外风电市场空间

单位：亿元

项目	2017年	2018年	2019年	2020年
海外风电市场空间	4080	4840	5416	5736
风电整机市场空间	2856	3388	3791	4015
叶片市场空间	665	789	883	936
塔架市场空间	540	640	717	759
齿轮箱市场空间	463	549	614	650
变流器箱市场空间	208	247	277	293
控制器市场空间	143	169	190	201
变桨系统市场空间	111	132	148	157
变压器市场空间	103	122	136	144
发电机市场空间	97	115	129	137
主轴市场空间	80	95	106	112
轴承市场空间	35	41	46	4

(2) 全球主要国家风电补贴政策。德国《可再生能源法》(Erneuerbare Energien Gesetz, EEG) 于 2017 年 1 月 1 日起正式施行。EEG 规定, 正式实行可再生能源项目招标竞价机制, 只面向新一轮竞价机制下招标成功的风电项目拨发专项补贴资金, 并通过规定年度招标规模的方式, 避免风能资源过度开发。同时, 对风电并网压力较大的德国北部地区的风能资源开发规模作额外限制。陆上风电项目的投标电价不得高于每千瓦时 7 欧分 (约合人民币 0.53 元), 项目补贴执行年限为 20 年。

美国可再生能源在联邦层次的优惠政策和补贴计划包括风能生产税抵减、投资退税和国家财政补贴计划以及税收加速折旧等。中国风电补贴政策是固定上网电价制和电力证书自愿认购体系。印度风电补贴政策是发电量激励政策和加速折旧优惠政策。墨西哥风电补贴政策是在 2015~2018 年投资 140 亿美元, 使墨西哥

风电装机总量提升至 9GW。全球总体来看欧美风电政策延续性比较强，新兴市场政策乏力^[2]。

1.2 国内风电市场现状及发展趋势

我国《风电发展“十三五”规划》明确指出，到 2020 年底，全国风电并网装机确保达到 2.1 亿 kW 以上，其中，海上风电确保建成 500 万 kW，同时加快开发中东部和南方地区陆上风能资源。为解决弃风限电问题，国家发改委能源局发布了《关于做好风电、光伏发电全额保障性收购管理工作的通知》，确保风电重点地区最低保障收购年利用小时数以内优先发电。为完善风电补贴机制，国家发改委能源局下发了《关于试行可再生能源绿色电力证书核发及自愿认购交易制度的通知》。

1. 国内风电市场的现状

(1) 中国风电总体装机情况。2016 年全国（除了港、澳、台地区）风电新增安装机组 11953 台，新增装机容量 23370MW，同比下降 24%，占全球风电新增装机容量的 42.7%。累计安装风电机组 10493 台，累计装机容量 168732MW，占全球风电累计装机容量的 34.7%。

中国海上风电装机延续增长势头，2016 年新增装机容量达到 590MW，同比增长 64%。截至 2016 年底，中国海上风电累计装机容量达到 1630MW，占累计装机容量的 0.97%。

风电机组平均功率不断增长，2016 年新增风电机组平均功率达到 1955kW，2MW 风电机组成为主导机型，新增装机容量占全国新增装机容量的 60.9%，1.5MW 机组和 2MW 机组合计市场份额达到 78.9%。

2016 年中国有 5 家风电整机制造企业出口机组到 7 个国家，发运容量 545MW，同比增长 98.4%。截至 2016 年底，中国风电机组出口国家达到 28 个，其中向美国出口的风电机组容量最多，累计达 410.75MW，占出口总容量的 16%。

2016 年中国风电有新增装机的开发企业超过 100 家，前 10 家新增装机容量超过 0.13 亿 kW，占 2016 年全部新增容量的 58.8%。累计装机容量前 10 家的开发企业装机容量超过 1 亿 kW，占全部累计装机容量的 69.4%。

(2) 我国六大区域的风电装机情况。2016 年我国六大区域的风电新增装机容量所占比例分别为西北地区（25.6%）、华北地区（23.64%）、华东地区（20.1%）、西南地区（14.01%）、中南地区（13.34%）、东北地区（3.31%）。与 2015 年相比，华东地区占比由 13% 增长到 20.1%，西南地区占比由 9% 增长到 14.01%，西北地区和东北地区均出现减少，其中西北地区占比由 38% 下降到 25.6%，中南地区占比维持不变。新增装机容量和累计装机容量见表 1.3。

表 1.3 2016 年我国六大区域新增装机容量和累计装机容量

地域	新增装机容量/MW	累计装机容量/MW
华北地区	5525.75, 内蒙古 (10.3%)、河北 (7.2%)、山西 (6.2%)	50288.8, 内蒙古 (16.6%)、河北 (7.5%)、山西 (5.3%)
西北地区	5984.7, 新疆(11.9%)、宁夏(5.0%)、陕西(4.7%)	46389.2, 新疆(11.3%)、甘肃(7.7%)、宁夏(5.0%)
华东地区	4694.7, 山东 (7%)、江苏 (5.1%)、江西 (3.2%)	25403.6, 山东(6.6%)、江苏(3.6%)、江西(1.5%)
东北地区	773.5, 黑龙江 (2%)、吉林 (1.1%)、辽宁 (0.2%)	19771.5, 辽宁 (4.6%)、黑龙江 (3.9%)、吉林 (3.2%)
西南地区	3274.1, 云南(8.4%)、四川(3.2%)、贵州(2.2%)	13837.3, 云南(4.7%)、贵州(2.2%)、四川(1%)
中南地区	3116.9, 湖北 (3.4%)、河南 (3%)、广西 (2.5%)	13040.3, 广东(2.1%)、湖南(1.7%)、湖北(1.5%)

(3) 四类风资源区装机情况。2016 年在四类风资源区中第Ⅳ类风资源区的装机最多, 占全年总装机的 64%, 其次是Ⅲ类风资源区, 装机占比为 18%, 然后是Ⅰ类风资源区 (9%) 和Ⅱ类风资源区 (9%)。与 2015 年相比, Ⅰ类和Ⅲ类风资源区所占比例均出现下降, Ⅳ类风资源区占比明显增长。截至 2016 年底, 这四类风资源区累计装机容量比例分别为Ⅰ类 (13%)、Ⅱ类 (19%)、Ⅲ类 (20%)、Ⅳ类 (48%)。

(4) 高海拔、低风速区域装机情况。我国高海拔地区主要分布在云南、贵州、四川、青海、西藏五省份。2016 年新增装机容量共计 3726.6MW, 同比下降 16.8%。云南、贵州两省同比分别出现下降 16%和 60%, 四川、青海新增装机容量持续增长, 四川同比增长 37%, 青海同比增长 64%, 西藏自治区仅在 2013 年有装机。

由于“十一五”“十二五”期间, 我国风电产业发展过速, “三北地区”等国内优良风电场资源被过度开发和利用。近年来, 高海拔、低风速地区风电场也被纳入风电开发的重点区域。此外, 低风速区主要分布在中部、南部地区。这些地区距离电能集中利用地区更近, 电网更加成熟, 电网建设投资成本更低, 因此低风速区资源近年来受到了青睐。在一段时期内, 低风速区风电场开发将保持一定热度。

中国低风速区域主要分布在中部地区、东南局部地区 (不包括沿海地区) 以及西北局部地区。目前在低风速区域有装机的省份主要有河南、安徽、江西、湖南、湖北中部五省, 另外其他省份还有山西、陕西、甘肃的平均风速在 6.5m/s 以下。2016 年新增装机容量 4330.3MW, 同比增长 25.4%, 累计装机容量 13569.5MW。同比增长的省份有湖北 (81.9%)、江西 (162%) 及其他省份 (31%); 同比下降的省份有湖南 (43.7%)、安徽 (39%)、河南 (1.5%)。

2. 中国风电行业实现健康发展应重点关注的方面

(1) 政策层弱化装机规模目标, 推进风电合理开发。在弃风限电形势严峻的

背景下，政策层弱化“十三五”期间风电装机规划的明确目标，而是强调提高核准计划执行率、项目审批向非限电区域倾斜，力图从宏观角度优化全国风电合理布局。

(2) 补贴退坡明确，国企可能成为坚守风电行业最后主体。2016年12月26日，国家发展和改革委员会发布《关于调整光伏发电陆上风电标杆上网电价的通知》(发改价格〔2016〕2729号)(以下简称《通知》)，降低2018年1月1日之后新核准建设的陆上风电标杆上网电价，与2016年核准项目电价相比，I类风资源区下调0.07~0.4元/(kW·h)，II类风资源区下调0.05~0.45元/(kW·h)，III类风资源区下调0.05~0.49元/(kW·h)，IV类风资源区下调0.03~0.57元/(kW·h)。另外值得注意的是云南省由之前的IV类风资源区调到了II类风资源区。根据《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》，2020年风电上网电价将与煤电电价相当。

海上风电标杆电价保持不变，近海风电项目标杆上网电价为0.85元/(kW·h)，潮间带风电项目标杆上网电价为0.75元/(kW·h)。由于2015~2016年执行的电价政策投资收益率吸引力不足，预计海上风电标杆电价有望上调，进一步带动正式商运投资。海上风电由于后期运维成本高昂，对初期设备选型要求严格，特别利好国内高端风电设备制造企业。

陆上风电标杆电价下调后将有一大部分风电项目不再具有开发价值，风电项目开发重心将逐渐向华南、华东等负荷中心区域集中。

补贴未来逐年大幅退坡已成为明确政策导向。补贴迟发、欠发现象严重令风电企业现金流更加吃紧，究其原因主要是可再生能源发展基金收不抵支和烦冗的补贴发放机制。其症结在于全国各省份之间用电量基数不同，各省份所收缴的可再生能源附加金额差距也很大。各省份之间的利益平衡只能由财政部从中央财政层面进行，导致补贴拖欠问题一直未能解决。补贴下降并且迟发、欠发导致风电企业现金流难以覆盖银行贷款利息，资金实力较弱的民营风电企业前景堪忧，而国有企业凭借低成本的融资能力和较高的风险承受能力或将成为风电行业的最后坚守者。

(3) 跨区域送电缓解风电消纳问题待解。中国电力负荷和能源资源之间的错位现象决定了跨区域送电成为中国电力未来发展的主要方向，特高压、跨区域送电线路建设逐年提速将助力电力远距离输送。然而，不可忽视的是，电源规划和电网规划并未达到匹配发展的均衡状态，拥有大量风电、火电机组的“三北地区”薄弱的网架结构以及因特高压交流输电设施建设相对缓慢造成的“强直弱交”的问题严重制约了跨区域送电能力。此外，如何平衡跨区域送电省和售电省之间的利益关系也成了跨区域待解难题之一。《通知》提出优先收购可再生能源电能的规定将有助于理顺跨区域送电的现存问题，缓解风电消纳难题，提升造价较高的特高压、跨区域送电线路利用效率。