

海洋可再生能源工程规划丛书

# 风力发电概论

INTRODUCTION TO OFFSHORE WIND POWER

王世明 曹宇 主编

上海科学技术出版社

海洋可再生能源工程规划丛书

# 风力发电概论

王世明 曹 宇

——主编——

上海科学技术出版社

### 图书在版编目(CIP)数据

风力发电概论 / 王世明, 曹宇主编. —上海: 上海科学技术出版社, 2019. 10

(海洋可再生能源工程规划丛书)

ISBN 978 - 7 - 5478 - 4547 - 9

I. ①风… II. ①王…②曹… III. ①风力发电  
IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 196570 号

### 风力发电概论

王世明 曹宇 主编

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行  
上海科学技术出版社  
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

印刷

开本 787×1092 1/16 印张 8.5

字数: 150 千字

2019 年 10 月第 1 版 2019 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5478 - 4547 - 9/TK · 21

定价: 35.00 元

---

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,  
请向工厂联系调换

# 内容提要

本书共分为六章,第1章介绍风力发电概念及国内外发展现状和趋势;第2章介绍风能资源的现状、评估和预测及风电场选址等;第3章介绍风轮机系统的原理及设计;第4章介绍海上风电的市场空间、我国海上风电发展情况,以及海上风电存在的问题和发展建议;第5章介绍风电并网技术、电网电压管理、电网电能质量管理、风电系统保护等;第6章介绍风电相关政策及其对风电的影响和作用,以及国内外风力发电案例和对风电市场的分析。

# 前 言

随着化石能源的不断消耗,新能源因具有污染少、储量大、永续性好等优点,其开发利用引起了世界各国的重视。我国新能源产业呈现强劲的发展势头,其中风电发展最为迅猛。

风能是一种清洁、廉价、储量极为丰富的可再生能源,它与常规能源不同,在其利用过程中不会产生环境污染问题,其储量也不会随着自身的转化和利用而减少。风能不但分布来源广泛、储量丰富,而且技术相对成熟,开发利用成本相对较低,具备了规模化开发利用的条件。风力发电是把风的动能转变成机械能,再把机械能转化为电能,原理是利用风力带动风车叶片旋转,再通过增速机将旋转的速度提升,促使发电机发电。

我国西北地区及东南沿海地区有丰富的风能资源,而这些地区又都存在能源短缺和环境污染问题,因此利用风电来改变能源结构并改善环境,不失为能源开发领域中重要的策略之一。目前,我国风电技术的开发利用取得了巨大进步,风电开发和利用技术位居世界前列。

本书共分为六章,第1章介绍风力发电概念及国内外发展现状和趋势;第2章介绍风能资源的现状、评估和预测及风电场选址;第3章介绍风轮机系统的原理及设计等;第4章介绍海上风电的市场空间、我国海上风电发展情况,以及海上风电存在的问题和发展建议;第5章介绍风电并网技术、电网电压管理、电网电能质量管理、风电系统保护等;第6章介绍风电的相关政策及其对风电的影响和作用,以及国内外风力发电案例和对风电市场的分析。

本书是由王世明教授、曹宇博士根据国内外院校和科研机构的成果进行归纳总结编写而成。研究生葛玲、李泽宇、于涛、骆锐东、李淼淼、龚芳芳、刘安东、王家之和贾巧娇为本书的资料收集和整理提供了一定的帮助,在此表示由衷的感谢!

由于笔者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请各位专家和读者批评指正。

作者

# 目 录

<b>1</b>	<b>绪论</b>	<b>1</b>
1.1	风力发电发展概况	3
1.2	国内外风力发电现状和发展趋势	4
1.2.1	风力发电技术概念	4
1.2.2	国外风力发电现状和发展趋势	5
1.2.3	我国风力发电现状和发展趋势	6
<b>2</b>	<b>风能资源的利用</b>	<b>9</b>
2.1	风能资源现状	11
2.1.1	国外风能资源现状	11
2.1.2	国内风能资源现状	13
2.1.3	全球能源状况	15
2.2	风能资源评估和预测	19
2.2.1	风能资源评估	19
2.2.2	风能资源预测	21
2.3	风电场选址	24
2.3.1	选址的技术原则	24
2.3.2	风电场现场位置选择对策	25

3.1	<b>风轮机动力学模型</b>	29
3.1.1	风速模型	29
3.1.2	风力机模型	30
3.1.3	异步发电机模型	31
3.1.4	双馈发电机模型	33
3.1.5	永磁直驱发电机	34
3.2	<b>风轮机翼型</b>	35
3.2.1	翼型的发展	35
3.2.2	NACA 翼型	36
3.2.3	翼型基本参数	36
3.3	<b>风轮机叶片基本理论</b>	37
3.3.1	叶片设计的动力学理论	37
3.3.2	风力机的特性系数	38
3.4	<b>风轮机材料</b>	39
3.4.1	风机叶片的原料	39
3.4.2	叶片材料	39
3.4.3	风机叶片的制造工艺	40
3.5	<b>风力发电机主传动系统总体设计</b>	41
3.5.1	系统组成	41
3.5.2	系统工作原理	42
3.5.3	系统布置形式	42
3.6	<b>风机主传动系统主要部件</b>	43
3.6.1	轮毂	43
3.6.2	主轴	44
3.6.3	齿轮箱	45
3.6.4	双馈异步电机	49
3.6.5	机舱底盘	49
3.6.6	塔架	50
3.7	<b>液压变桨距控制系统</b>	52
3.7.1	工作原理	52
3.7.2	变桨距风力发电机组的运行状态	53
3.7.3	液压控制变桨	54
3.8	<b>偏航系统</b>	55
3.8.1	功能和原理	55

3.8.2	风向、风速信号的采集	57
-------	------------	----

## **4 海上风电** **59**

---

4.1	<b>海上风电的市场空间</b>	61
4.1.1	应用前景	61
4.1.2	海上风电的市场	62
4.2	<b>我国海上风力发电发展现状和趋势</b>	72
4.2.1	行业背景	72
4.2.2	风电市场区域分析	73
4.2.3	海上风电社会效益	73
4.3	<b>海上风电存在的问题和发展建议</b>	74
4.3.1	存在的问题	74
4.3.2	发展建议	75
4.4	<b>海上风电未来发展趋势</b>	76

## **5 风电并网运行** **79**

---

5.1	<b>电力系统运行</b>	81
5.2	<b>风电功率预测</b>	81
5.3	<b>风电并网技术</b>	83
5.4	<b>电网电压管理</b>	83
5.4.1	风电并网对系统电压静态特性的影响	83
5.4.2	风电并网对系统电压动态特性的影响	84
5.4.3	大规模风电场并网后自动电压控制策略	85
5.4.4	汇集站与风电场的无功电压协调控制	86
5.4.5	风电场并网后无功电压管理策略	87
5.5	<b>电网电能质量管理</b>	87
5.5.1	我国风电有关电能质量标准化工作	87
5.5.2	电能质量主要指标的监测分析	88
5.6	<b>风电系统保护</b>	90
5.6.1	安全保护系统	91
5.6.2	恶劣天气保护	95
5.7	<b>风力发电设备的维护</b>	96
5.7.1	故障诊断	97
5.7.2	故障诊断系统	97
5.7.3	风力发电连接器的选择和维护	98

6.1	风电政策	101
6.2	国内外政策对风电的影响和作用	105
6.2.1	对国内的影响和作用	105
6.2.2	对国外的影响和作用	105
6.2.3	对我国的启示	107
6.2.4	国内风力发电相关政策	107
6.3	激励政策的分析和预测	109
6.4	激励政策对风电电价的影响和作用	113
6.4.1	电价的组成和影响因素	113
6.4.2	风电电价差异及变动趋势	115
6.4.3	风电电价的确定	116
6.4.4	国内近海风电电价与其他国家对比	116
6.4.5	海上风电造价与陆上风电成本对比	117
6.5	风力发电工程实践	117
6.5.1	西班牙第一台海上风机	117
6.5.2	海上首台 GW 3.0MW(S)单桩机组	119
6.5.3	首个装机 252 MW 海上风电工程	121
6.6	风力发电市场分析	122
6.6.1	国外风电市场	122
6.6.2	国内风电市场	123

**参考文献****124**

# 1

## 绪 论

风力发电发展概况

国内外风力发电现状和发展趋势



## 1.1 风力发电发展概况

风能不但分布来源广泛和储量丰富,而且其开发应用技术相对成熟,开发利用成本相对较低,具备了规模化开发利用的条件,因此风能这种可再生清洁能源日益受到了世界各国的关注。我国不但拥有丰富的风能资源,而且风力发电(简称“风电”)开发和利用技术位居世界前列。

自 20 世纪 50 年代末以来,随着世界各国对环保、能源短缺及节能等问题的日益关注,大规模利用风电被公认是减少空气污染、缓解能源短缺的有效措施之一。我国三北地区(西北、华北、东北)及东南沿海地区有丰富的风能资源,而这些地区又都存在能源短缺和环境污染的问题,因此,通过利用风电来改变能源结构并改善环境,不失为能源开发领域中重要的策略之一。

我国的风电发展历程主要分为以下四个阶段:

### 1) 第一阶段:研究试验阶段(20 世纪 50—60 年代)

该阶段主要是我国风力发电机组技术发展的试验阶段,并未得到实际的开发和利用,基本上处于探索状态。由于受当时经济和技术条件的限制,大多数机组在试运行时就损坏,并未能形成产品。不过这种初期阶段的探索为后来研制风力发电机组提供了宝贵的经验。

### 2) 第二阶段:离网式风电发展阶段(20 世纪 60—80 年代)

这一阶段主要是从离网式小风机的研发推广开始的。在国家科学技术委员会等有关部委的领导和协调下,我国开始组织全国力量重点对小型风力发电机组进行科技攻关,促进小型风力发电机组商品化,并在内蒙古等省、自治区组织示范试验和推广应用。这一阶段的风电发展主要是解决农村无电地区的电力供应问题,这种离网式小风机对解决边远地区基本生活用电起到了重大作用。

### 3) 第三阶段:并网风电试点和示范阶段(20 世纪 80—90 年代)

这一阶段的特点是我国政府开始重视对大型风电技术的开发和利用,并开始着手风电场的规划建设,使并网风电试点的数量由少到多,试点规模从小到大,试点的地域分布也逐渐扩大。从 20 世纪 80 年代中期开始,我国开始重点对中型和大型风力发电机组进行科技攻关,同时引进国外大型风力发电机组,着手规划风电场的建设,进行试验示范。这一时期,我国风电场的建设得到了迅速发展。

### 4) 第四阶段:规模化发展阶段(20 世纪 90 年代至今)

该阶段我国政府采取了一系列的活动推动了并网风电的发展,并采取了比较明确的激励政策和措施来推动风电的规模化发展,使风电产业规模扩大,风电技术的发展有了长足的进步,并取得了明显的经济效益和社会效益。辽宁、新疆、广东和内蒙古是我国风电发展最快的地区。经过多年实践,一批专业的风电设计、开发建设和运行管理队伍渐渐形成,我国已基本掌握了大型风力发电机组的制造技术,其中主要零部件国内都能自主制造。

回顾我国风电发展 15 年历程,以 2007 年作为起点,风电行业已经经过了两个成长

周期,2018年又是新一轮周期的开始。第一、二轮成长始于《中华人民共和国可再生能源法》(以下简称“《可再生能源法》”)的颁布实施、风电标杆电价的确立与调整、清洁能源中长期发展规划等政策性支持,自上而下的政策支持是风电发展的驱动力。风电行业发展15年成长周期如图1-1所示。

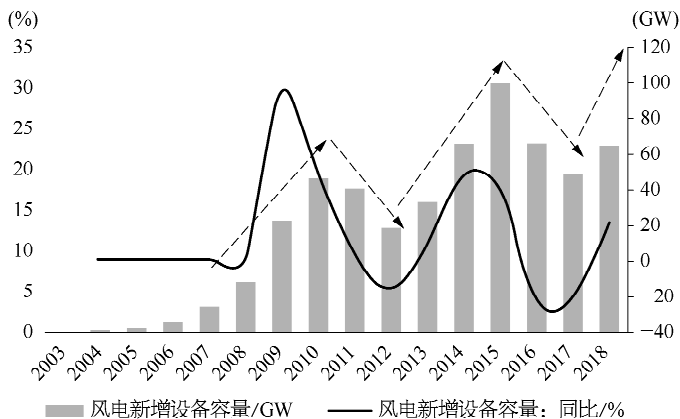


图 1-1 风电行业发展 15 年成长周期

如前所述,与第一、二轮成长周期不同,驱动风电进入第三个成长周期的动因主要来自行业自身经济回报的提升和资产价值的回归,叠加产业政策高密度、持续性的支持,风电有望进入新的成长阶段。

从历年新增装机数据看,国内前五大风机制造商市场占比不断提升,凭借成本优势、融资、运维服务等综合能源服务拓展,风电设备龙头公司市占率预期继续提高,风电设备领域二次洗牌也将在风电成长过程中出现,届时龙头公司优势将愈加明显。受益于风电行业新成长驱动,风机设备需求将放量。行业面临的风险因素包括风电装机增长不及预期、风机价格下降导致毛利大幅回落、风电上网电价大幅下调等。

## 1.2 国内外风力发电现状和发展趋势

### 1.2.1 风力发电技术概念

风力发电技术是指把风能转变为电能的技术,其通过风力发电机实现,利用风力带动风车叶片旋转,再通过增速机将旋转的速度提升,来促使发电机发电。

风力发电的基本原理是风的动能通过风轮机转换成机械能,再带动发电机发电转换成电能。主导的风力发电机组一般为水平轴式风力发电机,它由叶片、轮毂、增速齿轮箱、发电机、主轴、偏航装置、控制系统、塔架等部件组成,如图1-2和图1-3所示。风轮的作用是将风能转换为机械能,它由气动性能优异的叶片装在轮毂上组成,低速转动的风轮由增速齿轮箱增速后,将动力传递给发电机。上述这些部件都布置在机舱中,整个机舱由塔架支起。为了有效地利用风能,偏航装置根据风向传感器测得的风向信

号,由控制器控制偏航电机,驱动与塔架上大齿轮咬合的小齿轮转动,使机舱始终迎向风。由于齿轮箱是在兆瓦级风力发电机组中过载频率和过早损坏率较高的部件,国外开始研制一种直接驱动型的风力发电机组(或“无齿轮风力发电机组”),这种机组采用多级异步电机与叶轮直接连接进行驱动的方式,免去齿轮为了跟踪最佳叶片尖速比,使风电机组在较大的风速范围内获得最佳功率输出,须对转速或功率进行调节。常用的调节方式有两种:一种是失速调节;另一种是变桨距调节,即叶片可以绕叶片上的轴转动,改变叶片气动数据,实现功率调节。

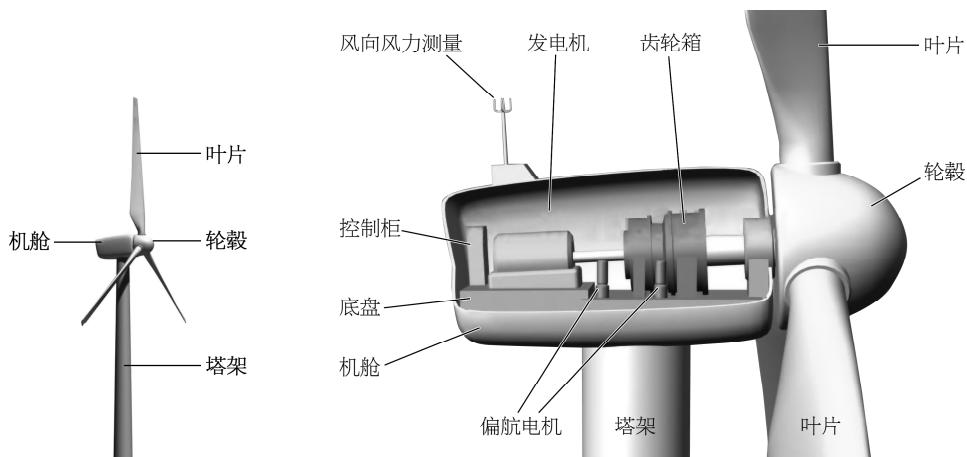


图 1-2 水平轴式风力发电机组组成图

图 1-3 机舱主要设备示意图

### 1.2.2 国外风力发电现状和发展趋势

欧洲风电行业在 2017 年创下了新增装机容量 3 148 MW 的纪录,达到 2016 年新增装机容量的两倍。2017 年共有 14 个项目上线,包括欧洲第一个漂浮式海上风电场(苏格兰海温德风力发电场)。在接下来的 2018 年,有 6 个风电项目在最终投资决议(FID)下完成安装,投资总额 75 亿欧元,可覆盖 2.5 GW 容量。

据全球风能理事会(GWEC)年度报告,2017 年欧洲投产的风电总装机容量中,有一半以上(53%)来自英国;德国为第二大市场,拥有欧洲总容量的 40%;比利时占总份额的 5%;芬兰启用了首个海上风电场。累计装机容量方面,欧洲风电装机前五位的国家和装机容量分别是:英国(6 836 MW)、德国(5 335 MW)、丹麦(1 271 MW)、荷兰(1 188 MW)和比利时(877 MW),前五位国家合计占欧洲并网风电项目装机容量的 98%。风机供应商呈现较高的集中度。西门子-歌美飒作为欧洲领先的风机供应商,占总装机容量的 64%,其全球风机市场份额虽由 2016 年的 67.8% 下降到 43%,但仍占据主导地位。三菱重工-维斯塔斯紧随其后,市场占有率为 18%,之后为萨维恩(8%)和艾德文(6%)。前四家公司合计占风机装机总数的 96%。

按照 GWEC 年度报告分析,无论是技术上还是商业上,风电在欧洲都已经成熟。对个人、投资机构和银行来说,风电都是一个诱人的投资机会,其成本已经明显下降,使

投资者对世界各地风电部署更加有信心。

预计到 2030 年,全球风电总装机容量将达到 120 GW,在此之前,每年的装机容量都将超过 10 GW。得益于建设能力强和成本低的优势,欧洲将是主要的增长地区。此外,中国和美国也将做出较大贡献。

### 1.2.3 我国风力发电现状和发展趋势

目前,我国已经成为全球风力发电规模最大、增长最快的市场。根据 GWEC 统计数据,全球风电累计装机容量从截至 2001 年 12 月 31 日的 23 900 MW 增至 2016 年 12 月 31 日的 486 749 MW,年复合增长率为 22.25%。而同期我国风电累计装机容量的年复合增长率为 49.53%,增长率位居全球第一;2016 年,我国新增风电装机容量 23 328 MW,占当年全球新增装机容量的 42.7%,位居全球第一。

我国风电场建设始于 20 世纪 80 年代,在其后的十余年中,经历了初期示范阶段和产业化建立阶段,装机容量平稳、缓慢增长。自 2003 年起,随着国家发展和改革委员会(简称“发改委”)首期风电特许权项目的招标,风电场建设进入规模化及国产化阶段,装机容量增长迅速。特别是 2006 年开始,连续四年装机容量翻番,形成了爆发式的增长。近年来,我国风电的快速发展得益于明确的规划和不断更新升级的发展目标,使得地方政府、电网企业、运营企业和制造企业坚定了对风电发展的信心,并且有了一个努力的方向和目标;风电的快速发展,也促使规划目标不断地修正和完善。在 2003 年召开的全国大型风电场建设前期工作会议上,国家发改委部署开展全国大型风电场建设前期工作,要求各地开展风能资源详查、风电场规划选址和大型风电场可行性研究工作。通过此项工作,各省、自治区、直辖市基本理清了风能资源储量,结合风电场选址,提出了各自的规划目标,为风电的快速发展打下了良好的基础。

目前,我国已经成为全球风力发电规模最大、增长最快的市场。据 GWEC 统计,2010 年,我国除台湾以外共新增风电机组 12 904 台,新增装机容量达 18 928 MW;2011 年,新增装机容量 18 000 MW,保持全球新增装机容量第一的排名;2012 年,新增装机容量 12 960 MW,位列全球新增装机容量第二位;2013 年,新增装机容量 16 100 MW,全球新增装机容量第一位。2010 年年底,我国累计风电装机容量为 44 733 MW,全球累计装机容量排名由 2008 年的第四位、2009 年的第二位上升到第一位。2016 年,我国新增风电装机容量 23 328 MW,占当年全球新增装机容量的 42.7%,截至 2016 年年底我国风电累计装机容量为 168 690 MW,占全球累计装机容量的 34.7%,位居全球第一位。

2002—2016 年,我国风电年度新增装机容量及增长率见表 1-1。

表 1-1 2002—2016 年我国风电年度新增装机容量及增长率

年份	年度新增风电装机容量/MW	年增长率/%
2002	66	—
2003	98	48.48
2004	197	101.02

(续表)

年份	年度新增风电装机容量/MW	年增长率/%
2005	507	157.36
2006	1 287	153.85
2007	3 312	157.34
2008	6 153	85.78
2009	13 781	123.97
2010	18 928	37.35
2011	18 000	-4.90
2012	12 960	-28.00
2013	16 100	24.23
2014	23 196	44.07
2015	30 500	31.49
2016	23 328	-23.51

2001—2016年,我国风电累计装机容量及年增长率见表1-2。

表1-2 我国风电累计装机容量及年增长率

年份	截至当年12月31日风电累计装机容量/MW	年增长率/%
2001	404	—
2002	470	16.34
2003	568	20.85
2004	765	34.68
2005	1 272	66.27
2006	2 559	101.18
2007	5 871	129.43
2008	12 024	104.80
2009	25 805	114.61
2010	44 733	73.35
2011	62 733	40.24
2012	75 324	20.07
2013	91 424	21.37
2014	114 609	25.36
2015	145 104	26.61
2016	168 690	16.25