

“十一五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程与应用丛书

现代风力发电 技术及工程应用

• 王志新 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

“十一五”国家重点图书出版规划项目
风力发电工程与应用丛书

现代风力发电技术及 工程应用

王志新 编著

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书涉及国内外现代风力发电技术现状与发展态势, 总结和分析了国内外大型风电机组最新技术成果。全书共 7 章, 包括大型风电机组建模, 大型风电机组控制, 大型风电机组功率控制, 风电场选址、风电机组选型与安装, 大型风电场接入电力系统与电力输送, 以及风电场远程监控与运行等内容。

本书适合作为高等院校风电、电气工程与自动化、机械工程、过程控制、自动化等专业的本科生和研究生教材, 也可以作为科研院所从事设计和工程应用的技术人员及管理干部, 风电机组及相关产业技术和管理人员, 风电公司设计和技术人员、科技管理人员, 以及风电场运营管理人员等的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代风力发电技术及工程应用 / 王志新编著. —北京: 电子工业出版社, 2010.10
(风力发电工程与应用丛书)

ISBN 978-7-121-11909-5

I. ①现… II. ①王… III. ①风力发电—基本知识 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 188724 号

责任编辑: 王敬栋 (wangjd@phei.com.cn)

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1000 1/16 印张: 14.75 字数: 306 千字

印 次: 2010 年 10 月第 1 次印刷

册 数: 4 000 册 定价: 39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

从 书 序

近十年来，风力发电在世界范围内得到了持续高速发展，为应对全球气候变化做出了重要贡献。风力发电清洁能源的兴起已成为低碳经济的重要标志之一。

虽然我国的风力发电产业起步较晚，但近年来，在政府的大力倡导下，呈现了高速增长的态势，大有后来居上的趋势。风力发电是一项新兴的综合性学科，涉及广泛的技术领域，包括气象学、空气动力学、机械电子工程、电力电子技术等，从业的工程技术人员需要通过系统的学习和培训，才能胜任相关的技术工作。目前，由于产业发展速度较快，相关技术人才十分紧缺。

电子工业出版社组织国内风力发电专家编写了“风力发电工程与应用丛书”，内容包括风电场的开发与建设，风力发电系统的设计、运行与维护，风力发电测试技术，现代风力发电技术及工程应用等，涉及内容广泛，可作为从事风力发电工作的各类技术人员的学习、培训教材，也可作为高等院校师生和相关工程技术人员的参考用书。相信丛书的出版，能够对培养我国风力发电专业技术人才，促进我国风力发电持续健康发展发挥重要的作用。

中国工程院 院士
浙江大学 教授



序

风能等可再生能源发电技术日趋成熟，其应用量不断增大，包括离网与并网运行两种方式。其中，并网发电要求解决电力系统接入相关技术难题，这些难题目前已成为制约我国乃至全球可再生能源发电规模化应用的主要因素之一。2009年，我国风电新增装机容量13.85GW，累计装机容量达到26GW，超过德国，位列全球第二位；预计到2020年，我国风电装机容量将超过150GW。随着今后我国风电装机规模的持续增长，制约风电并网发电及与电力系统接入存在的矛盾将显得更加突出，迫切需要解决并网发电与电力系统接入等技术关键问题；同时，国内高校纷纷开设风电专业，风电等人才培养急需相关教材。

《现代风力发电技术及工程应用》一书由风电机组建模、大型风电机组控制、大型风电机组功率控制、风电场选址与风电机组选型和安装、大型风电场接入电力系统与电力输送，以及风电场远程监控与运行等7章组成，内容丰富、数据翔实、技术先进，总结、分析了国内外大型风电机组及其控制技术最新技术成果。上海交通大学王志新教授近年来一直从事风力发电科研、教学工作，主讲可再生能源发电系统（Renewable Energy System for Electric Power Generation）等课程，该书的内容取材于其团队承担完成的科研项目取得的成果，涉及风电机组变桨控制、风电场远程监控、海上风电柔性直流输电等成果，代表了该领域国际发展的先进水平。

因此，该书值得作为我国高校风能专业及相关专业的本科生和研究生的教材，以及风电业界工程技术人员、管理干部的参考用书。相信该书的出版，有助于为我国风电事业的发展、风电技术进步、风电人才培养及智能电网技术应用做出重大贡献。

香港大学荣誉教授

中国工程院院士

英国皇家工程院院士
世界电动车协会主席

陳清泉

2010年4月15日

前 言

全球风电发展迅速,2009 年全球新增风电装机容量 38.1GW,累计风电装机容量约为 158.9GW,年同比增长 31%。2009 年我国(不含台湾省)新增风电装机数量 1 0129 台,容量为 13.803GW,年同比增长 124%;累计风电装机数量为 2 1581 台,容量为 25.805GW,年同比增长 114%。我国台湾省当年新增风电装机数量 37 台,容量为 77.9MW;累计风电装机数量为 227 台,容量为 436.05MW。预计 2020 年我国风电总装机容量将超过 150GW。

大型风电场建设正从陆地向海上发展,海上风电已成为风力发电的重要方向。2007 年全球海上风电装机总容量已从 2000 年的 31.45MW 跃升至 1.08GW;2008 年达到 1.5GW,丹麦、英国、瑞典、德国、爱尔兰、荷兰、中国、日本和比利时等国家发展较快。其中,英国累计装机容量达到 598.4MW,超过丹麦的 415.7MW,成为海上风电装机容量最大的国家。2009 年欧洲海上风电装机容量为 2GW,建成 38 个海上风电场。据欧洲风能协会预测,到 2020 年,欧洲近海风电总装机容量将达到 70GW。

我国正加大海上风电建设与应用示范工作进程。2007 年,在渤海辽东湾南部海域、距海岸约 46km 处安装了 1 台 1.5MW 直驱风电机组,通过约 5km 长的海底电缆将电力输送至绥中 36-1 油田独立电网,与 4 台双燃料透平机组组成互补系统。位于上海临港新城至洋山深水港的东海大桥近海风电场已建成,34 台 3MW 机组于 2010 年 7 月 6 日全部并网发电。该风电场总装机容量为 102MW。

我国大型风电机组,尤其是海上大型风电机组发展迅速,对相关技术书籍的需求量巨大,但至今国内外有关现代风力发电技术的书籍不多,难以满足研发、工程应用与教学等实际需求。

本书共 7 章,由上海交通大学王志新编著,总结和分析了国内外大型风电机组最新技术成果,主要内容包括大型风电机组建模,大型风电机组控制,大型风电机组功率控制,风电机选址、风电机组选型与安装,大型风电场接入电力系统与输送,以及风电场远程监控与送行管理。本书取材于王志新团队承担完成的科研项目成果,团队成员包括武黎、张华强、孔屹刚、朴海国、吴定国、李响、王国强、李爽、李晓燕、袁海、戴蕴、夏凯、王成、赵清声等,在此深表感谢。

由于风力发电技术涉及面广,发展迅速,加之时间与水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,恳请广大读者批评指正。

编著者
2010 年 4 月于上海

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 风力发电发展概况	1
1.1.1 风力发电的背景	2
1.1.2 风力发电发展现状与前景	5
1.1.3 风力发电技术发展态势	8
1.2 大型风电机组控制与并网技术	11
1.2.1 风力发电系统结构	11
1.2.2 风电机组状态监测	13
1.2.3 风电机组功率控制技术	15
1.2.4 低电压穿越技术	16
1.2.5 高压柔性直流输电风电场并网技术	18
思考题	19
第 2 章 大型风电机组建模	20
2.1 数学模型	20
2.1.1 风能模型	20
2.1.2 空气动力学模型	24
2.1.3 传动系统模型	28
2.1.4 风力发电机模型	29
2.1.5 双向 PWM 变换器功率控制模型	35
2.2 风力发电机叶片	37
2.2.1 叶片翼型与优化	37
2.2.2 叶片材料	39
2.3 大型风电机组轴系模型	42
2.3.1 风力机系统模型	42
2.3.2 双馈风电机组柔性轴系模型	44
思考题	45
第 3 章 大型风电机组控制	46
3.1 大型风电机组控制系统	46
3.1.1 大型风电机组控制系统的功能	46

3.1.2	大型风电机组智能控制	47
3.2	大型风电机组并网控制	48
3.2.1	大型风电机组并网控制过程	48
3.2.2	大型风电机组柔性并网控制策略	50
3.2.3	大型风电机组负载并网	51
3.3	大型风电机组变换器技术	52
3.3.1	大型双馈风电机组变换器	52
3.3.2	大型直驱型风电机组变换器	55
3.3.3	大功率变换器	60
3.4	大型风电机组智能控制	63
3.4.1	大型风电机组分层多模最优控制策略	63
3.4.2	大型风电机组智能控制策略	65
	思考题	73
第 4 章	大型风电机组功率控制	74
4.1	大型风电机组最大能量捕获原理	74
4.1.1	风能转换原理	74
4.1.2	最大风能追踪方法	75
4.2	大型风电机组变桨距控制	80
4.2.1	大型风电机组变桨距控制方法	80
4.2.2	大型风电机组智能变桨距控制	83
4.2.3	大型风电机组变桨距控制形式	98
4.3	风力发电机偏航控制	100
4.3.1	迎风偏航系统及其控制	100
4.3.2	基于风向标和输出功率的偏航控制方法	101
4.3.3	粒子群算法 PID 神经网络偏航控制策略	104
4.4	变速恒频双馈风力发电机控制	113
4.4.1	定子磁链定向矢量控制	113
4.4.2	采用 SFO 的定子磁链定向矢量控制	114
	思考题	116
第 5 章	风电场选址、风电机组选型与安装	117
5.1	风资源勘查与评估	117
5.1.1	风资源勘查	118
5.1.2	风资源勘测设备及测风塔位置选择	118

5.1.3	风资源评估	120
5.2	风电机组选型	122
5.2.1	双馈风电机组	122
5.2.2	直驱型风电机组	127
5.3	风电场选址	128
5.3.1	地质地形环境与风电机组选型	128
5.3.2	风电场微观选址	129
5.3.3	风速预测计算	131
5.4	风力机变桨载荷分析计算	136
5.4.1	风力机载荷	136
5.4.2	风力机坐标系选择	138
5.4.3	风力机变桨载荷计算	139
5.4.4	风力机变桨载荷计算实例	143
5.5	海上风电场选址与基础设计施工	151
5.5.1	海上风电场场址勘测	151
5.5.2	海上风电机组基础	151
5.6	海上风电机组安装	154
5.6.1	海上风电机组吊装设施	154
5.6.2	海上风电机组安装	154
5.6.3	海上风电场变电站安装	155
	思考题	155
第 6 章	大型风电场接入电力系统与电力输送	156
6.1	大型风电场接入电力系统	156
6.1.1	并网型风电机组	156
6.1.2	风电场与常规能源发电厂的主要区别	157
6.1.3	风电并网存在问题	157
6.2	大型风电场电力输送技术	162
6.2.1	大规模风电输送概况	162
6.2.2	大型风电场电力输送技术	163
6.3	海上风电场输电技术及输电工程应用	165
6.3.1	海上风电场输电方案	165
6.3.2	海上风电场柔性直流输电变换器	171
6.3.3	海上风电场柔性直流输电经济性分析	180
	思考题	185

第 7 章 风电场远程监控与运行	186
7.1 概述.....	186
7.1.1 风电场 SCADA 系统.....	186
7.1.2 风电场监控系统技术关键.....	187
7.2 风电机组监控系统.....	188
7.2.1 工作原理.....	188
7.2.2 系统结构.....	189
7.2.3 监控系统的功能.....	189
7.2.4 监控系统的通信方式.....	191
7.3 风电机组振动监测技术应用.....	195
7.3.1 风电机组运行故障.....	195
7.3.2 SKF 在线、离线振动监测系统.....	198
7.3.3 SKF 状态监测系统特点及风电机组振动监测应用.....	200
7.4 风电场远程监控系统设计及无线网络技术应用.....	203
7.4.1 风电机组监控系统设计.....	203
7.4.2 风电场多机监控系统设计.....	206
7.4.3 管理级设计及监控软件.....	209
7.4.4 基于以太网和地面无线测控网的风电场监控通信系统设计.....	211
7.4.5 大型海上风电场监控系统.....	215
思考题.....	217
参考文献	218

第 1 章 概 论

1.1 风力发电发展概况

风能是一种开发成本较低、清洁、安全、可再生的能源。因此，风能的开发利用越来越受到重视。根据贝兹理论，风力机从风中吸收的能量不到空气动能的 59.3%，同时由于受到机械结构等限制，实际值更小。因此，如何提高风能转化效率，获取更多风能，实现风能规模化利用，一直为学者及业界所关注。近年来，大型风电机组通过采用变速变桨距控制及最大功率跟踪 MPPT 等技术，旨在提高响应速度，获得最大能量（低风速时捕获最大功率，高风速时捕获额定功率）。但是，由于一些不确定因素的存在，风能转换系统表现出强非线性特征，风力机产生的能量随着风速和风向的连续波动是快速变化的。传统线性定常控制器因存在较大超调和损失，系统稳定性差，不适合用来控制大型变速变桨距风电机组。根据风速大小，风力发电系统由 4 个动态过程构成，即启动、变速运行、变桨距运行和刹车。其中，启动、刹车过程使系统能在最短时间内有较快的响应速度；变速运行调节风能，减少或消除风能产生过程中的急剧波动，捕获最大能量，减弱暂态负荷的影响；变桨距控制通过调节桨距角维持风电机组输出额定功率不变。

世界上第 1 台风电机组于 1891 年在丹麦建成，但由于技术和经济等方面的原因，风力发电一直未能得到广泛应用。直到 1973 年发生了石油危机，美国、西欧等发达国家为寻求替代化石燃料的能源，投入大量经费，采用新技术研制现代风电机组。20 世纪 80 年代开始建立示范风电场。20 世纪 90 年代，许多国家纷纷制定了激励风力发电发展的优惠政策。1992 年以来，全球风电累计装机容量的年增长率一直高于 15%，风力发电技术日臻成熟。2002 年 4 月 2~5 日，首届世界风能大会在法国巴黎举行，欧洲和北美风力发电技术发展迅速。2006 年，全球已有 48 个政府引入法规扶持风力发电等可再生能源的发展。2008 年年底全球累计风电装机容量已超过了 120.8GW，相当于减排 1.58 亿吨 CO₂。美国风电市场近几年来一直保持高速发展，2009 年新增风电装机容量 9.92GW，累计风电装机容量达到 35.16GW，排名世界第 1。

我国已成为继欧洲、美国和印度之后风力发电应用的主要市场之一，风能资源丰富，可开发量为 1400GW。其中，陆上开发量为 600GW；海上开发量为 800GW。我国在 20 世纪 50 年代末，使用各种木结构的布篷式风车。20 世纪 70 年代中期以后，风能开发利用列入“六五”国家计划。20 世纪 70 年代末到 80 年代初，自主研发、批量生产了 10kW 以下的小型风力发电机，解决了居住分散的农牧民和岛屿居民的生产、生活用电，风力发电停留在蒙古包单家独户使用或实验室研究阶段。1983 年，

山东引进3台丹麦 Vestas 55kW 风力发电机,开始了并网发电技术的试验和示范;1986年5月,山东荣成建成我国第一个并网风电场,其次是新疆达坂城风电场。1986~1993年,全国共建12个风电场,装机容量为13.3MW;1994~1999年,全国共建有21个风电场,装机容量达到249.05MW。其中,1992~1996年的主力机型为200~300kW机组,1997~2002年的主力机型则为600kW机组。2008年,我国累计装机容量达到12.21GW,其中并网发电的装机容量为8.94W。截止到2009年年底,我国风电并网总量累计达到16.13GW,累计装机容量为25805.3MW。

1.1.1 风力发电的背景

1. 能源危机

能源是人类赖以生存的物质基础。自从工业革命以来,全球的能源消耗飞速增长,推动了世界工业化的进程,提高了社会发展水平和人类生活质量。全球经济的急剧增长对能源的需求越来越大,能源危机制约了人类进一步发展。自20世纪50年代以后,由于石油危机的爆发,对世界经济造成巨大影响,国际舆论开始关注世界能源危机问题。全球能源危机的主要表现在于,全球能源储量与开采时间有限。可以支配的化石资源的极限大约为1180~1510亿吨,以1995年世界石油的开采量33.2亿吨计算,石油储量大约在2050年左右即将枯竭;天然气储量估计131800~152900m³,年开采量维持在2300m³,将在57~65年内枯竭;煤的储量约为5600亿吨,1995年煤开采量为33亿吨,可以供应169年;铀的年开采量目前为每年6万吨,据1993年世界能源委员会的估计可维持到21世纪30年代中期。

综上所述,煤炭、石油、天然气等不可再生化石能源的总量有限,亟待开发新的可再生能源。

2. 环境危机

在能源消耗急剧增长,能源危机凸显的同时,环境危机也出现了。现代社会对能源的巨大需求,导致大量的化石能源被燃烧。燃烧不断产生CO₂和其他温室气体,使得原来沉积在地下的碳元素,被大量释放到空气中。据估计,按照目前的趋势,到2030年,由各种温室气体增加所引起的气候变化,将相当于把大气中CO₂浓度提高到工业化社会以前CO₂浓度的两倍。到2100年,温室效应强度将相当于把大气中CO₂浓度提高到工业化社会以前CO₂浓度的3倍,达到5000万年前的CO₂浓度水平。能源消费在迅速扩大,已经达到了阻碍地球生态系统自律功能正常运转的程度。研究表明:地球变暖并不是地球本身自然循环的变化,而是由人类活动排放的CO₂等温室气体效应造成的。其过程与人类大量消耗化石能源资源,尤其是燃烧化石燃料发电大量排放的CO₂密切相关。到2015年,世界温室气体的排放量将达到最高,全

球变暖带来的影响将不仅仅是更多的旱涝灾害，还有海平面的上升。全球气候的变化对农业和生态造成了严重的影响，时刻威胁着人类的生命和财产安全。

3. 可再生能源开发利用

目前，如何解决能源危机及其引起的环境危机成为全球经济可持续发展所面临的亟待解决的重大课题。克服能源危机的出路在于大力发展新能源，用可再生能源替代化石能源。电能具有转换和传输方便的优点，已成为现代工业快速发展不可替代的二次能源。为缓解或从根本上消除能源危机及其带来的环境破坏，绿色电力的生产为世界各国所关注。绿色电力来源于风能、小水电、太阳能、地热、生物质和其他可再生能源。因为它们在生产的过程中不消耗煤、石油、天然气等燃料，所以不会产生对环境有害的排放物。相对于常规火力发电，更有利于环境保护和可持续发展。因此，开发绿色电力意义重大。

表 1-1 比较了不同能源发电方式对环境造成的影响。全球市场对于风电这样的零排放技术有着巨大且持续增长的需求。为了避免发生不可逆转的气候变化后果，全球的温室气体排放必须在 2020 年前后达到峰值且开始下降，而风电是目前唯一能实现这一目标的发电技术。表 1-2 比较了不同能源发电方式的经济成本。

表 1-1 不同能源发电方式对环境造成的影响

	空气污 染	气候 改变	土地 使用	水质 污染	野生 动物	辐 射
煤	SO ₂ 、NO ₂ : 极高 有毒金属及有机污 染: 中等	燃烧生成 CO ₂ 、CH ₄ ; 极高, 采矿、制造设备 及运输用能源	开采煤矿破坏 土地, 氮化沉淀 物	煤矿中等, 氮化 沉淀物非常高, 冷 却系统后不可用	空气污染: 高	铀
油	SO ₂ 、NO ₂ : 高, 有毒金属及有机污 染: 中等	燃烧生成 CO ₂ 、CH ₄ ; 开采煤矿、制造设备用 能源	开采及气管, 有毒固体或泥泞	蒸汽机: 中等, 漏油: 可能高	油管及钻探: 中等, 漏油: 高	几乎为零
天然气	视成分而定, NO _x	燃烧: 中等, 制造设备所用能源: 低	开采及气管	低至极低	油管及钻探: 低	几乎为零
风能	几乎为零	制造设备用能源: 非 常低	高, 但同时可 用于农业或牧业	几乎为零	几乎为零	几乎为零
太阳能	几乎为零	制造设备用能源: 低	高	几乎为零	几乎为零	几乎为零
水电	几乎为零	在热带地区可能高, 其他地区则低; 从生物 质中产生 CO ₂ 、CH ₄	高	高	几乎为零	几乎为零
核电	几乎为零	制造设备用能源: 非 常低	非常低	高	高	高至极高

表 1-2 不同能源发电方式的经济成本 单位: 元/kW·h

发电方式	当前发电成本	当前发电成本与燃煤发电成本之比
小水电	0.26~0.44	1.2~1.9
沼气、生物质发电	0.30~0.73	1.3~3.2
风电	0.37~0.51	1.7~2.2
光伏发电	2.01~2.98	8.9~13.0

4. 风能储量与利用

太阳的辐射造成地球表面受热不均,引起大气层中压力分布不均,同时,地球发生自转,使空气沿水平方向运动,空气流动所形成的动能称为风能。据估计到达地球的太阳能只有大约 2% 转化为风能,理论上仅 1% 的风能就能满足人类能源的需求。全球的风能总量约为 $2.74 \times 10^6 \text{GW}$,其中可利用的风能总量为 $2.74 \times 10^4 \text{GW}$,比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍。根据我国 900 多个气象站陆地上离地 10m 高度资料进行估算,全国平均风功率密度为 100W/m^2 ,风能资源总储量为 3226GW ,可开发和利用的陆地上风能储量为 600GW ,海上可开发和利用的风能储量为 800GW ,共计约 1400GW 。50m 或更高处可开发利用的风能储量为 2000GW 。

人类利用风能的历史可以追溯到公元前。在蒸汽机发明以前,风能曾经作为重要的动力,用于船舶航行、提水饮用和灌溉、排水造田、磨面和锯木等。埃及被认为可能是最先利用风能的国家。12 世纪,风车从中东传入欧洲。16 世纪,荷兰人利用风车排水。随着煤、石油、天然气的大规模开采和廉价电力的获得,由于成本高、效率低、使用不方便等,风力发电机械无法与蒸汽机、内燃机和电动机等竞争而逐渐被淘汰。1891 年,丹麦建成了世界第一座风力发电站。20 世纪 30 年代,丹麦、瑞典、苏联和美国应用航空工业的旋翼技术,成功地研制了一些小型风电机组。这种小型风电机组被广泛运用在多风的海岛和偏僻的乡村,所获得的电力成本比小型内燃机的发电成本低很多。不过,当时的发电量较低,大都在 5kW 以下。1973 年,世界石油危机爆发以后,风能作为新能源得到重视,世界风力发电发展速度开始加快,各国都在积极研制、开发 100kW 以上的大型风电机组。美国在 1974 年开始实施联邦风能计划,20 世纪 80 年代成功开发了 100kW 、 200kW 、 2000kW 、 2500kW 、 6200kW 、 7200kW 等 6 种风电机组。瑞典、荷兰、英国、丹麦、德国、日本、西班牙等国,也根据各自国家的情况制订了相应的风力发电计划。在 20 世纪 70 年代中期以后,我国将风能开发利用列入“六五”国家重点项目,得到迅速发展。我国风力发电从 20 世纪 80 年代开始真正起步。20 世纪 70 年代末 80 年代初,我国自主开发研制并批量生产了额定容量 10kW 以下的小型风电机组,解决了居住分散的农牧民和岛屿居民的生产生活用电。1986 年 5 月,山东荣成建成了我国第一个并网风电场。

20世纪80年代中期以后,我国先后从丹麦、比利时、瑞典、美国、德国引进一批中、大型风电机组,在新疆、内蒙古的风口及山东、浙江、福建、广东的岛屿建立了8座示范性风电场。

1.1.2 风力发电发展现状与前景

1. 世界风电

(1) 风电成本

不考虑常规电力环境成本,根据目前的风电技术水平,风电成本仍高于常规电力成本,因此许多国家采取了诸如价格、市场配额、税收等各种激励政策,从不同的方面引导和支持风力发电的发展。经过30年的努力,随着市场不断扩展,风电成本大幅度下降,每千瓦时风电成本由20世纪80年代初的20美分下降到2007年的4~6美分。在风能资源较好的地方,风电价格完全可以和煤电竞争,低于燃气电价。

(2) 装机容量高速增长

根据全球风能协会公布的2003~2007年统计数据,全球风电平均增长率为24.7%。到2007年年底,全球总装机容量累计达到近94GW,新增风电装机容量20GW,分布在全球70多个国家和地区。2007年全球大约生产了2000亿度风电电力,约占全球电力供应的1%。按照累计风电装机容量数据排名,2007年,全球前十名的国家依次是德国、美国、西班牙、印度、中国、丹麦、意大利、法国、英国和葡萄牙。2008年全球新增装机容量超过27GW,同比增长42%,风电装机增长率为29%,高于过去5年的平均增长速度。2008年年底,总装机容量达到了120.8GW,美国超过德国,跃居全球风电装机容量首位,同时也成为第二个风电装机容量超过20GW的风电大国。中国超过印度,成为亚洲第一、世界第四的风电大国。到2008年年底,在世界风电累计装机容量中,已有包括美国、中国、德国、西班牙、印度等在内的16个国家超过1GW。在欧盟2007年新增发电装机容量中,风电开始超过天然气发电成为第一大新增电源,占新增容量的46%。欧洲2008年风电新增装机容量为88GW,累计装机容量达到了66GW。美国2007年新增的风电装机也仅次于天然气发电,位居第二。2008年内美国竣工的风电项目容量更是占当年度美国所有新增电力装机的42%,新增装机容量达到8.34GW,同比增长157%,累计增长49.6%,完成新增投资170亿美元。风电在欧美发达国家已经逐步成为重要的替代能源。

(3) 发展规划

20世纪90年代初,欧盟提出了大力发展风电,到2010年风电装机容量达到40GW的目标,并要求其成员国根据总体发展规划制订本国的发展目标与实施计划。2007年年初,根据技术发展和能源需求的需要,欧盟又进一步修订了发展计划,希望2010年风电装机容量达到80GW;到2020年风电装机容量达到180GW,发电量达到

3600 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ；2030 年风电装机容量达到 300GW，发电量达到 $6\,000 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$ ，分别占届时欧盟发电装机容量和发电量的 35% 和 20%。2006 年，美国可再生能源理事会提出了将可再生能源的比例由目前的 4% 左右，提高到 2025 年的 25% 的发展目标。美国风能协会也提出了未来依靠风电满足国内 20% 电力需求的宏伟目标。英国、法国、加拿大、澳大利亚、日本和东欧的波兰等国也开始加速发展风电。

(4) 发展前景

据全球风能理事会预测：未来 5 年全球风电还将保持 20% 以上的增长速度；到 2012 年，全球风电装机容量将达到 240GW，年发电为 $5\,000 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$ ，风电电力约占全球电力供应的 3%；欧洲将继续保持总装机容量第一的位置，亚洲将会超过北美市场排在第二位；到 2012 年，欧洲、亚洲和北美市场的风电装机容量预期为 102GW、66GW 和 61.3GW，占全球市场的份额依次是 42.5%、27.5% 和 25.5%，亚洲的市场份额明显上升，其次是北美，而欧洲在全球风电市场中的份额明显下降；在亚洲和北美市场中增长最快、贡献最大的国家将是中国和美国。该机构 2006 年所做的《2050 年风电发展展望》认为，如果采取积极措施，2030 年和 2050 年，世界风电装机将分别达到 210GW 和 300GW，发电量分别达到 $50\,000 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$ 和 $80\,000 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$ 。

2. 我国风电

(1) 装机容量

2004 年年底，全国的风力发电装机容量约为 764MW。2005 年 2 月《可再生能源法》颁布之后，当年风力发电新增装机容量超过 60%，总容量达到了 1260GW。2006 年新增装机容量超过 100%，累计装机容量超过 2.6GW。2007 年又新增装机容量 3.3GW，累计装机容量达到 5.9GW，超过丹麦，成为世界第 5 风电大国。当年装机增量仅次于美国和西班牙，超过德国和印度，成为世界上最主要的风电市场之一。风电累计装机容量从 2003 年年末的 567MW 增加到了 2008 年年末的 12.21GW，增加了 205 倍。2008 年新增装机容量超过印度，成为亚洲第一、世界第四、风电装机容量超千万千瓦的风电大国。2009 年新增装机容量 13.85GW，累计装机容量为 26GW，总装机容量跃居世界第 2 位。

(2) 风电设备制造能力

风电设备制造业发展迅猛。2005 年之前，我国只有少数几家风电设备制造商，它们规模小、技术落后，风电场建设主要依赖进口。《可再生能源法》颁布后，风电整机制造企业已超过 40 家。除金风科技和浙江运达加大投入、迅速扩张之外，东方汽轮机、华锐风电、中国船舶、通用电气、湖南湘电、上海电气、广东明阳、维斯塔斯、歌美飒、苏司兰、西门子等一批国内外大型制造业和投资商纷纷进入我国风电设备制造业市场。

(3) 风电技术研发

“九五”和“十五”期间，我国政府组织实施“乘风计划”和“国家科技攻关计划”，以及国债项目和风电特许权项目，支持建立了首批6家风电整机企业，进行风电技术的引进和消化吸收，部分企业掌握了单机容量600kW和750kW定桨距风电机组的总装技术和关键部件设计制造技术，实现了规模化生产，迈出了产业化发展的第一步。“十五”期间，还开展了1000kW、1500kW变速恒频风电机组，以及1200kW永磁直驱风电机组的研发与联合攻关，取得阶段性成果。经过“十五”期间的自主研究和技术引进，我国已基本掌握了以双馈发电机为代表的变速恒频风电机组的控制技术，研制成功兆瓦级风电机组样机。我国风电技术与国外风电技术的差距正在不断缩小。

(4) 发展前景

2005年，首个有关我国风电发展现状及未来的前瞻性报告《风力12在中国》正式对外公布。该报告将风力发电确定为我国电力事业未来发展的重点。报告指出，我国有能力在2020年实现40GW的风电装机容量，年发电量将达到 $800 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，可以满足8000万人的用电需求，同时每年可减少4800万吨的 CO_2 排放量；风电在电源结构中届时约占全国总发电装机1000GW容量的2%~3%，总电量的1%~1.5%。世界风电设备制造商和开发商均认为中国是最具有发展前景的风电市场。按照欧盟的经验，我国风电装机容量在2010年和2020年分别达到30GW和150GW是完全有技术和市场保证的。我国风电装备制造业的情况可能更加乐观。根据中国可再生能源专业委员会推断，2012年我国风电装备制造能力将达到10~15GW。除了能够满足我国风电市场的需求之外，还有可能成为世界主要的风电装备制造基地，开始向美国、欧洲等地区出口。

我国风电发展面临无限的机遇，到2020年将超过核电成为第三大主力发电电源。2030年以后，水能资源大部分将开发完，近海风电市场进入大规模开发时期。在2050年前后，风电装机容量达到或超过400GW，超过水电，成为第二大主力发电电源。因此，风力发电未来可能成为我国的主要战略能源之一。以上海海上风电规划建设为例，总装机容量为5950MW，如表1-3所示。

表 1-3 上海海上风电规划

	2010~2015年		2015~2020年		2020年以后	
	离岸距离(km)	装机(MW)	离岸距离(km)	装机(MW)	离岸距离(km)	装机(MW)
东海大桥风电场	12.5	200	—	—	—	—
奉贤风电场	12.4	300	12.4	100	—	—
南汇风电场	22.3	500	28.8	100	—	—
崇明风电场	—	—	35.2	950	—	—