

“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

风力发电系统 的设计、运行与维护

● 叶杭冶 等编著



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

风力发电系统 的设计、运行与维护

● 叶杭冶 等编著



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统介绍了我国风能资源基本情况，风电场开发程序及相关技术要求，以及风力发电机组的基本类型、总体结构、控制系统、操作系统、运行方式与监控技术等；并以典型的双馈式风力发电机组与直驱式永磁风力发电机组为例，介绍了风力发电机组的主要部件及维护要求；对海上风电场开发的相关技术也做了介绍。

本书可以作为风电场设计、运行与维护人员的培训教材，也可作为风力发电行业工程技术人员参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

风力发电系统的设计、运行与维护 / 叶杭冶等著. 北京：电子工业出版社，2010.4
（风力发电工程与应用丛书）

ISBN 978-7-121-10493-0

I. 风… II. 叶… III. ①风力发电—发电厂—基本知识②风力发电机—机组—基本知识 IV. TM62
TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2010）第 040062 号

责任编辑：张剑

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：17.5 字数：363 千字

印 次：2010 年 6 月第 2 次印刷

册 数：2 000 册 定价：45.00 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。

风力发电工程与应用丛书编委会

主任委员：叶杭冶

副主任委员：姚兴佳 王志新

委 员：（以姓氏笔画为序）

王益全 申新贺 史晓鸣

邢作霞 许国东 陈 棋

丛书策划：张 剑

丛 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”，内容包括了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

发展新能源与可再生能源是人类应对气候变化,实现人与自然和谐发展所采取的一项长期的战略任务。风能是目前可再生能源中技术相对成熟,并具规模化开发利用前景的一种清洁能源,在完成这一全球性的历史使命中,将会起到重要的作用。

风能的开发利用是一项系统工程,涉及政策、法律、技术、经济、社会、环境和教育等方面。随着风能的迅速发展,风能教育、风能专业技术人员的培训已变得越来越重要。

我国风能专家叶杭冶研究员长期从事风力发电机组的研究和开发工作,有着丰富的实践经验。由他编著的《风力发电系统的设计、运行与维护》一书将风力发电作为一个系统,结合我国风能开发利用的特点,从风能资源评估、风力发电机组集成、风电场建设、风力发电并网运行和维护等方面做了全面介绍。书中还给出了很多实例,是一本应用性很强的专业图书,可作为风电场设计、运行和维护技术人员的培训教材,对在风电行业工作的其他工程技术人员和高等院校师生来说也是一本很好的参考书。

近年来,电子工业出版社等机构出版了不少与风能技术相关的专业图书,对推进我国风能发展起到了重要的作用,在此,我要向图书的作者和出版社表示衷心的感谢。

中国可再生能源学会副理事长



2009年12月15日

前 言

从最近几年全球风能开发利用的规模及预期目标来看,风力发电将成为未来能源的重要组成部分已成为共识。根据欧盟的发展规划,2020 年风力发电在能源中的所占份额将达到 20%。自 2005 年以来,我国的风电场建设持续高速发展,装机容量连年翻番,截至 2009 年年底,全国装机容量已经超过 25GW。有关专家预计,到 2020 年我国风力发电装机容量将达到 150GW。

目前我国从事风力发电的技术人员约为 4 万人,其中风电场规划设计与运行维护人员约 2 万人,设计制造人员约 2 万人。随着产业的迅速发展,从业的专业技术人员还在不断增加。风力发电是一门新兴的多学科、多专业综合的技术,大部分从业人员需要经过专门的技术培训方能理解、掌握相关知识。由于缺乏系统的培训教材,许多风电场业主难以对从业人员进行职业培训,其运行和维护人员的培训主要通过购买制造厂商产品附带的技术培训,以及厂家对相关产品介绍及其运行维护手册的宣传、贯彻来实现。

本书系统介绍了我国风资源基本情况,风电场建设的相关技术要求,以及风力发电机组的基本类型、总体结构、控制系统、操作系统、运行方式、状态监测和机组的维护等内容,对海上风电场开发的相关技术也做了介绍。

本书由叶杭冶、许国东、史晓鸣、陈棋、申新贺等编写。其中,叶杭冶编写了第 1 章和第 4 章,许国东编写了第 2 章和第 3 章,陈棋编写了第 5 章和第 9 章,史晓鸣编写了第 6 章和第 8 章,申新贺编写了第 10 章。全书由叶杭冶修改、统稿。参加本书编写的还有余钧等。

国家风力发电工程技术中心对本书的编写提供了大力支持,并提供了直驱式永磁风力发电机组的相关资料,在此深表感谢。本书还参考了大量部件供货商的产品资料,在此一并致谢。

由于风力发电技术涉及面广,其发展日新月异,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

2009 年 12 月于杭州

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 我国的风能资源和开发程度	(1)
1.2 我国风能资源开发利用的重点区域	(2)
1.3 我国风电场实际运行效果	(4)
1.4 我国的风电装备制造业	(5)
第 2 章 风电场的选址技术	(7)
2.1 风电场选址概述	(7)
2.1.1 风电场选址考虑的基本要素	(7)
2.1.2 风电场选址步骤	(8)
2.2 风电场的风资源评价	(11)
2.2.1 风力资源评估所需的基本资料	(11)
2.2.2 风电场场址风能资源评估	(12)
2.2.3 观测数据的分析统计	(15)
2.2.4 风电场年发电量的计算	(17)
2.2.5 风资源评价应遵循的有关规范及要求提供的图表	(18)
2.2.6 风资源评价成果在技术经济分析中的应用	(18)
2.3 风电场场址的选择	(19)
2.3.1 风电场选址的基本条件	(19)
2.3.2 风电场选址的基本方法	(22)
2.3.3 风电场选址的技术标准	(22)
2.4 风力发电机组现场位置排布方法	(23)
2.4.1 风力发电机组位置排列	(23)
2.4.2 风力发电机组尾流效应	(24)
2.4.3 风电场现场位置选择对策	(24)
第 3 章 风力发电对电网的影响	(27)
3.1 风力发电特性	(27)
3.2 风力发电对电能质量的影响	(29)
3.3 风力发电对电网稳定性的影响	(34)
3.3.1 电压稳定性	(35)
3.3.2 频率稳定性	(42)

第 4 章	并网运行的风力发电机组	(45)
4.1	风力发电机组的主要形式	(45)
4.2	风力发电机组的结构	(47)
4.3	风力发电机组的特性	(48)
4.4	风力发电机组的控制技术	(57)
第 5 章	双馈式变速恒频风力发电机组	(60)
5.1	综述	(60)
5.2	风轮	(62)
5.3	机舱	(64)
5.4	塔架	(75)
5.5	基础	(76)
5.6	变流器	(77)
5.7	控制系统	(80)
第 6 章	双馈式风力发电机组的运行控制	(85)
6.1	交流励磁变速恒频技术	(85)
6.2	双馈式风力发电机组的控制	(87)
6.3	双馈式风力发电机组的运行过程	(90)
6.4	风力发电机组的启动与关机程序	(94)
6.5	安全链	(103)
6.6	控制系统硬件	(107)
6.7	系统操作	(118)
6.8	SCADA 监控系统	(151)
第 7 章	直驱式永磁同步风力发电机组	(178)
7.1	低速永磁同步风力发电机	(178)
7.2	直驱式永磁风力发电机组系统参数	(180)
7.3	直驱式永磁风力发电机组并网运行特性	(183)
7.4	全功率变流系统	(189)
第 8 章	风力发电机组的维护	(197)
8.1	维护项目分类和所需工具	(197)
8.2	风力发电机组各部件的维护工作	(199)
第 9 章	安全预防	(223)
9.1	安全防护装备	(223)
9.2	机组安装现场安全总则	(225)
9.3	常规安全事项	(226)

9.4 安全用电	(227)
9.5 事故急救	(227)
第 10 章 海上风力发电技术	(229)
10.1 海上风力发电发展现状	(229)
10.2 海上风力发电资源	(231)
10.3 海上风力发电的发展历程	(233)
10.4 海上风力发电技术的应用	(239)
10.5 海上风力发电的前景展望	(254)
附录 A 风力发电机组运行维护检修项目表	(256)
附录 B 润滑说明表	(260)
附录 C 主要螺栓紧固扭矩表	(261)
附录 D ABB 变频器维护表	(262)
参考文献	(263)

第 1 章 绪 论

1.1 我国的风能资源和开发程度

我国幅员辽阔, 海岸线长, 风能资源丰富。根据第三次风能资源普查结果, 我国技术可开发 (风能功率密度在 $150\text{W}/\text{m}^2$ 以上) 的陆地面积约为 $24 \times 10^4 \text{km}^2$ 。考虑风电场中风力发电机组的实际布置能力, 按照 $5\text{MW}/\text{km}^2$ 计算, 陆上技术可开发量为 $120 \times 10^4 \text{MW}$ 。这一结论与联合国环境规划署组织国际研究机构, 采用数值模拟方法开展的风能资源评价研究, 得出的陆地上离地面 50m 高度层风能资源技术可开发量可以达到 $140 \times 10^4 \text{MW}$ 的结论大体相当。

根据《全国海岸带和海涂资源综合调查报告》, 海岸带宽度按从海岸线向内陆扩展 10km, 向外海延伸到 15~20m 水深计算, 全国海岸带面积约 $250 \times 10^4 \text{km}^2$ 。2002 年我国颁布了《全国海洋功能区划》, 对港口航运、渔业开发、旅游以及工程用海区等做了详细规划。如果避开上述这些区域, 考虑其总量 10% 的海岸带面积可以利用, 风电机组的实际布置按照 $8\text{MW}/\text{km}^2$ 计算, 则近海风电装机容量约为 $200 \times 10^4 \text{MW}$ 。而事实上, 海上风资源可利用面积远大于此, 从目前欧洲海上风电示范项目来看, 海上风力发电机组安装在水深 50m 以内技术上并没有障碍, 因此我国海上可开发的风能潜力巨大, 风电具有构成未来能源重要组成部分的资源基础。

我国的风能资源分布广泛, 其中较为丰富的地区主要集中在北部 (东北、华北、西北) 地区和东南沿海地区及其附近岛屿, 近海风能资源也非常丰富。此外, 内陆也有个别风能资源丰富点。

北部地区风能资源丰富带包括东北三省、河北、内蒙古、甘肃、宁夏和新疆等省 (区) 近 200km 宽的地带。风功率密度在 $200 \sim 300\text{W}/\text{m}^2$ 以上, 有的可达 $500\text{W}/\text{m}^2$ 以上, 如阿拉山口、达坂城、辉腾锡勒、锡林郭勒灰腾梁、承德围场等。

沿海及其岛屿地区风能资源丰富带包括山东、江苏、上海、浙江、福建、广东、广西和海南等省 (市) 沿海近 10km 宽的地带, 风功率密度在 $200\text{W}/\text{m}^2$ 以上, 风功率密度线平行于海岸线。

近海风能丰富区包括东南沿海水深 5~50m 的海域, 面积辽阔, 风功率密度为 $250 \sim 400\text{W}/\text{m}^2$, 虽然受到航线、港口、养殖等海洋功能区划的限制, 仍然有巨大的开发潜力, 特别是在江苏、浙江、福建、山东和广东等地, 近海风能资源丰富, 距离电力负荷中心很近, 近海风电可以成为这些地区未来发展的一项重要的清洁能源。

除在两个风能丰富带之外, 内陆风功率密度一般在 $100\text{W}/\text{m}^2$ 以下, 但是在某些

地区由于湖泊和特殊地形的影响,风能资源也较丰富。

我国的风能资源有以下两个特点。

1) 风能资源季节分布与水能资源互补 我国风能资源丰富,但季节分布不均匀,一般春季、秋季和冬季丰富,夏季贫乏。我国的水能资源丰富,雨季在南方大致是3~6月(或4~7月),在此期间的降水量约占全年的50%~60%;在北方,不仅降水量小于南方,而且分布更不均匀,冬季是枯水季节,夏季为丰水季节。丰富的风能资源与水能资源季节分布恰好互补,大规模发展风力发电可以在一定程度上弥补我国水电冬春两季枯水期发电电力和电量之不足。

2) 风能资源地理分布与电力负荷不匹配 沿海地区电力负荷大,但是风能资源丰富的陆地面积小;北部地区风能资源很丰富,电力负荷却很小,给风电的经济开发带来困难。

由于大多数风能资源丰富区远离电力负荷中心,电网建设薄弱,大规模开发需要电网延伸的支撑。我国风电开发程度还很低,截至2008年年底,风电装机总量为 $1.2 \times 10^4 \text{ MW}$,不到可开发量的1%。虽然目前各大电力公司及风电投资商在风力资源较好地区跑马圈地,所占容量也不过 $8 \times 10^4 \text{ MW}$,约占资源量低限的10%。未被开发的资源潜力还十分巨大。

1.2 我国风能资源开发利用的重点区域

我国的风电资源分布不平衡,主要的资源分布在北部和沿海地区,各省、市之间资源也不平衡,风能资源比较丰富的省、市、自治区主要有内蒙古、新疆、河北、吉林、辽宁、黑龙江、山东、江苏、福建和广东等,有望大规模开发的省、自治区主要有内蒙古、辽宁、河北、吉林、甘肃、新疆和江苏等。

1. 内蒙古自治区

10m 高度风功率密度大于 150 W/m^2 的面积约 $10.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,技术可开发量约 $50 \times 10^4 \text{ MW}$ 。风能资源丰富的地区主要分布在东起呼伦贝尔西到巴彦淖尔广袤的草原和台地上。最早的风电场建在苏尼特右旗的朱日和,1989年安装了从美国引进的单机100kW的变桨距下风式机组。20世纪90年代中期,重点开发了察右中旗的辉腾锡勒风电场,主要是从丹麦、德国和美国进口的机组,到2004年年底装机约69MW。2004年以后,内蒙古东部加快风电发展,相继建成几个超过100MW的风电场,如克什克腾旗的赛罕坝和翁牛特旗的孙家营。2008年年底,内蒙古自治区风电装机容量达到了3735MW,形成了塞罕坝、辉腾梁和辉腾锡勒三大风电基地,三者均有可能在2020年达到 $1 \times 10^4 \text{ MW}$ 的特大型风电基地。

2. 辽宁省

陆地 10m 高度风功率密度大于 $150\text{W}/\text{m}^2$ 的风能资源储量约为 $5.4 \times 10^4\text{MW}$, 渤海、黄海海域的风能资源储量约为 10^5MW 以上, 技术上具有开发价值的风能资源丰富区和较丰富区占全省面积的 40% 以上。辽宁省沿海六市是我国为数不多的临海强压型风能丰富区。另外, 与风能资源最丰富的内蒙古自治区接壤的辽西北一带, 由于两侧被丘陵束缚, 天然形成了强大的风力收缩区。2008 年年底, 辽宁省装机容量达到 1249MW 。

3. 河北省

10m 高度风功率密度大于 $150\text{W}/\text{m}^2$ 的面积约 7378km^2 , 技术可开发量约 $4 \times 10^4\text{MW}$ 。风能资源丰富的地区主要分布在河北省北部的张家口市坝上地区和承德市的围场县和丰宁县, 沿海岸线的黄骅港附近风能资源也较为丰富。1996 年, 在张北县的“坝头”茴菜梁村附近建设了第一个风电场, 安装了从丹麦、德国和美国进口的机组, 装机容量近 10MW 。2001 年起, 承德市围场县开始建设风电场, 到 2006 年年底围场县红松洼风电场装机容量达到 106MW 。2008 年年底, 河北省风电装机容量达到 1100MW , 主要分布在张家口和承德两地。其张北和坝上地区, 有望在 2010 年成为装机容量达到 $1 \times 10^3\text{MW}$ 、2020 年达到 $1 \times 10^4\text{MW}$ 的特大型风电基地。

4. 吉林省

10m 高度风功率密度大于 $150\text{W}/\text{m}^2$ 的面积约 2000km^2 , 技术可开发量 $1 \times 10^4\text{MW}$ 。风能资源丰富的地区主要分布在西部的白城、通榆、长岭和双辽等地。1999 年, 在通榆的更生屯建设第一个风电场, 引进了西班牙和德国的机组。隔了 5 年之后才在白城建设第二个风电场, 以后发展迅速, 到 2008 年年底, 吉林风电装机容量已经达到 1069MW 。

5. 甘肃省

甘肃省地处河西走廊, 10m 高度风功率密度大于 $150\text{W}/\text{m}^2$ 的面积约 $3 \times 10^4\text{km}^2$, 技术可开发量可达 $15 \times 10^4\text{MW}$ 。风能资源丰富的地区主要分布在安西、酒泉等与新疆和内蒙古接壤的具有加大风速地形条件的地域。

虽然甘肃省发展风电起步较晚, 却大有后发制人之势。2008 年年底, 甘肃省风电装机已经达到 637MW 。甘肃省率先启动了全国第一个千万千瓦级风电项目, 并且在第 5 次风电特许权招标中, 一次性确定了 21 个风电场工程项目, 总容量达到了 $4 \times 10^3\text{MW}$ 。甘肃省有望成为继内蒙古自治区之后我国最大的风电开发区。

6. 新疆维吾尔自治区

新疆地区 10m 高度风功率密度大于 $150\text{W}/\text{m}^2$ 的面积约 $8 \times 10^4 \text{km}^2$ ，技术可开发量可达 $40 \times 10^4 \text{MW}$ 。风能资源丰富的地区主要分布在达坂城、小草湖和阿拉山口等具有加大风速地形条件的地域。

新疆是我国最早大规模开发风电的省区，1986 年就在达坂城附近安装了几台从丹麦引进的机组进行试验。1989 年利用丹麦政府赠款项目建设第一个风电场，共有 13 台 150kW 机组，装机容量达 1.950MW，是当时全国规模最大的风电场。新疆为并网风电成为电力工业新的电源起到了重要的示范作用。直到 2001 年新疆的风电装机容量在全国都居于首位，后来由于受到电网容量的限制，制约了风电的发展。

2008 年年底，新疆风电装机容量 576MW，主要集中在达坂城地区。新疆正在开发吐哈风电，打造千万千瓦的风电基地，预计可望与甘肃酒泉地区的千万千瓦风电基地一起成为风电西电东送的源头。

7. 江苏省

江苏省风能资源总储量为 $3.469 \times 10^4 \text{MW}$ ，风能资源技术可开发区域面积约为 1505km^2 ，包括近海滩涂地区，技术可开发量可达 $2.1 \times 10^4 \text{MW}$ ，其中内陆 $0.3 \times 10^4 \text{MW}$ ，近海 $1.8 \times 10^4 \text{MW}$ 。全省风能资源分布自沿海向内陆递减，沿海及太湖地区风能资源较为丰富，尤其是沿海岸地区，而内陆地区风能资源相对贫乏，风能资源有明显的东、西部差异。

1.3 我国风电实际运行效果

根据中国水电工程顾问集团公司 2009 年 3 月发表的《2008 年度中国风电场建设成果统计报告》，选择 2008 年没有新增装机的 76 个风电场，从当年的上网电量计算出 15 个省的平均年等效满负荷小时数。其中，省平均年等效满负荷小时数最高为 2400h，最低为 1297h，全国平均年等效满负荷小时数为 1794h，比估测值 2000h 约小 10%（见表 1-1）。统计中的风电场多采用技术成熟的机组，上网电量主要受风能资源和管理水平的影响。这一结果也表明，我国的风力发电项目的可行性论证和风电场运行管理水平亟待提高。

表 1-1 2008 年部分省（区）风电场等效满负荷小时数和上网电量

省（区）	风电场数	省平均等效满负荷小时数/h	投产容量/MW	上网电量/（MW·h）
河 北	4	2400	164.95	408762
内 蒙 古	13	2127	825.36	1748860
辽 宁	13	1433	330.26	510080
吉 林	4	2031	118.71	239210

续表

省(区)	风电场数	省平均等效满负荷小时数/h	投产容量/MW	上网电量/(MW·h)
黑龙江	7	2230	227.8	490066
上海	1	1528	3.4	5195
浙江	2	1363	38.35	51431
福建	5	2275	158.15	425754
山东	8	1672	223.25	371930
湖北	1	1333	13.6	18130
广东	8	1753	290.64	530906
海南	1	1628	8.7	14165
甘肃	3	1297	358.8	457644
宁夏	3	1621	257.7	442311
新疆	3	2212	106.11	234378

1.4 我国的风电装备制造业

在国家可再生能源发展规划和风电装备国产化等相关政策的支持下,我国风电产业得到了快速发展,涌现出一批实力雄厚的风电设备整机制造企业,并形成了完整的配套产业链。2007 年新增市场份额首次超过进口机组。我国风电产业表现出了良好的发展势头,受到世人瞩目,并有力支持了我国风能资源的开发。

1. 整机

我国开展风电机组研制历史较长,但近年来才走上了产业化发展道路。自 20 世纪 80 年代起,我国就通过国家科技攻关计划以科研课题方式陆续支持研制并网型风电机组,单机容量 18~200kW,但绝大部分没有实现产业化。“九五”和“十五”期间,政府组织实施“乘风计划”、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引进和消化吸收,其中部分企业掌握了单机容量为 600kW 和 750kW 的定桨距风力发电机组总装技术和关键部件设计制造技术,初步掌握了定桨距机组总体设计技术,实现了规模化生产,迈出了产业化发展的第一步。2004 年以来,随着国家陆续制定出台了促进风电等可再生能源发展的相关法规和扶持政策,众多新的国内外企业大举投入中国风电整机制造业,通过引进生产许可证,建立合资企业,开展自主研发或联合研发等手段,研制兆瓦级以上风力发电机组产品。总体来看,随着大批实力雄厚的企业投入风力发电机组研制工作,显著加快了中国风电装备制造业的产业化发展进程。

在要求 70%国产化率的政策支持下,全国风电场装机容量增长率连续 4 年高于

100%。2008 年年底达到 $1.2 \times 10^4 \text{MW}$ 。在国内新增市场中，内资企业生产的风力发电机组产品所占的市场份额也不断上升，2008 年达到 75%。

主流风力发电机组产品的技术性能和产业化水平有了明显提升，单机容量为 1.5MW 的变桨变速风力发电机组成为近期市场主流机型。近年来，我国大部分企业重点开发生产兆瓦级变桨变速恒频风力发电机组，包括双馈式、永磁直驱式两大主流技术，还有部分企业引进了混合驱动技术。

我国风力发电机组主流机型已经转向兆瓦级以上大容量机组。目前，除已经产业化的 1.5MW 各种机型外，2~3MW 机型正在逐渐进入市场，预计在 2010 年实现批量化生产；5MW 机型也已进入研发阶段。

企业规划产能迅速扩大，将有力支撑国内风电建设，初步调查统计显示，我国仅内资整机企业 2010 年的规划年产能就已经超过 $8 \times 10^3 \text{MW}$ ；加上合资企业和外资企业，2010 年的总年产能将超过 $1 \times 10^4 \text{MW}$ 。从目前风电产业发展的情况看，国内风电整机制造企业的近中期规划产能远超过每年同期国内风电设备市场需求预期，而且机型产品同质性明显，市场竞争显示出日趋激烈的趋势，使得一批企业开始寻求国际市场。

2. 部件

在国家产业政策的引导下，特别是国家特许权项目招标要求参加投标机组国产化率达到 70% 以上的规定，吸引了一大批实力雄厚的专业配套厂家投入风力发电机组主要部件的开发，风力发电机组的国产化水平迅速提高，通过 1.5MW 变速恒频风力发电机组的国产化，国内已具备桨叶、发电机、齿轮箱等关键部件的开发能力，特别是近年来完成了变距轴承、偏航轴承和主轴承的开发，大大加快了我国风电制造业的发展。目前专业厂家正在完成控制系统、变频器和变桨系统的国产化，以期突破我国风电装备产业化发展的最后屏障，形成完整的具有强大支撑能力的配套产业链。

第2章 风电场的选址技术

2.1 风电场选址概述

风电场选址是风电场建设首先应解决的问题，也是风电场建设中关键的第一步，直接关系到风电场经济效益的好坏。风电场选址在许多方面与水电厂、核电厂等存在同样的问题。但也有其特殊性，即对一个已知的风力发电机组，在场址未确定以前，是不能估算该机组的年发电量的，这是风力发电与其他发电厂选址所不同的。

2.1.1 风电场选址考虑的基本要素

一个好的风电场首先应该有经济上的可行性，同时还要符合环境要求和有关制度的限制。风力发电机组和该风电场风况匹配情况、风力发电机组对系统电网的动态影响等也是要考虑的因素。

1. 经济性

风电场的度电（kW·h）成本是评价经济性的主要指标。度电成本可表示为

$$C = \frac{A + M}{E_c} \quad (2-1)$$

式中， E_c 为年发电量； M 为年运行维护费用； A 为项目投资每年等额折旧，可由下式计算：

$$A = P \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (2-2)$$

式中， P 为总投资； i 为贷款利率； n 为折旧年限。

风资源是风电场选址时要考虑的主要因素。选择一个风能资源丰富的场址，安装与该场址风能特性相匹配的风力发电机组，可以提高机组的年发电量，从而减少度电成本。这也是要把具有最丰富的风资源的地方作为候选风电场的主要原因。

风电场投资也是影响风电场的经济性主要因素，包括风电场选址评估费、设备造价、设备运输和施工费，以及征地费、土建工程费、道路的修建、接入系统的方式等。