



风能技术

〔日〕牛山 泉 编著
刘 薇 李 岩 译

新能源技术

风能技术

〔日〕牛山 泉 编著

刘 薇 李 岩 译

科学出版社

北 京

图字: 01-2007-4562 号

内 容 简 介

本书是“新能源技术”丛书之一。风能作为一种重要的可再生能源,其具有清洁、无污染、安全、储量丰富的特点,受到世界各国的普遍重视。本书主要讲解了风车和风力发电发展史、风的特性和风能资源、风力发电机组的布置、风力发电机组基础理论、风力发电系统设计、风力发电系统控制等内容。本书内容丰富、图文并茂、重点突出、应用性强。

本书可供风力发电技术领域的工程技术人员、研发人员、管理等相关人员阅读,也可作为高等院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

风能技术/(日)牛山 泉著;刘薇,李岩译. —北京:科学出版社,2009
(新能源技术)

ISBN 978-7-03-024554-0

I. 风… II. ①牛…②刘…③李… III. 风力能源-利用 IV. TK81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 070848 号

责任编辑:赵方青 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:李 力

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>

丽源印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2009 年 6 月第一次印刷 印张: 17 1/4

印数: 1—4 000 字数: 325 000

定 价: 39.80 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

Original Japanese language edition
Furyoku Energy Dokuhon
by Izumi Ushiyama. et al.
Copyright ©2005 by Izumi Ushiyama
Published by Ohmsha, Ltd.
This Chinese version published by Science Press, Beijing
Under license from Ohmsha, Ltd.
Copyright ©2009
All rights reserved

風力エネルギー読本
牛山 泉 オーム社 2005

作者简介

牛山 泉

出生于长野县

1971年 攻读上智大学研究生院理工学研究科机械工程专业博士学位，
任足利工业大学机械工程专业讲师

1974年 获工学博士学位
任足利工业大学机械工程专业副教授

1985年 任足利工业大学机械工程专业教授

1989年 兼任电大客座教授

1998年 兼任足利工业大学综合研究中心主任
兼任中国浙江工业大学客座教授

2003年 足利工业大学研究生院研究科教授

另外，还担任上智大学理工学部、庆应义塾大学理工学部、鹤冈工业
高等学校、国际协力机构筑波国际研修中心等客座讲师

编 著

牛山 泉 (足利工业大学)

执 笔 者

石原 孟	(东京大学)	3 章
鱼崎 耕平	(财团法人 日本气象协会)	11 章
牛山 泉	(足利工业大学)	1 章, 9.1 节~9.4 节
小川 晋	(财团法人 日本电机工业会)	8.2 节, 12.1 节
窪田 新一	(财团法人 新能源财团)	12.2 节
齐藤 哲夫	(富士电机系统株式会社)	8.3 节
杉谷 照雄	(千代田化工建设株式会社)	3 章
胜吕 幸男	(三菱重工业株式会社)	6 章
铃木 章弘	(有限会社 风能研究所)	10 章
铃木 和夫	(株式会社 日立工程服务部)	8.1 节
铃木 靖	(财团法人 日本气象协会)	2 章
关 和市	(东海大学)	5 章
中尾 徹	(E&E Solutions)	3 章
永尾 徹	(富士重工业株式会社)	6 章
根本 泰行	(足利工业大学)	4 章, 9.5 节
松坂 知行	(八户工业大学)	7 章
村上 光功	(日立造船株式会社)	8.4 节

译者序

能源与环境是当今世界各国所面临的两大课题。开发对环境无污染的新能源与可再生能源是能源发展的主要方向。在我国新能源产业振兴规划中,风电产业被列为未来发展的重点之一。近年来,得益于国家政策的大力支持和丰富的风能资源,我国风电事业的发展突飞猛进。2008年,全国新增风电装机总量超过650万千瓦,全国累计总装机容量达到1240万千瓦,分布在全国25个省、直辖市和自治区。现在,中国已经跻身于世界风电装机容量超千万千瓦的风电大国行列。

日本是世界风能研究和利用的先进国家,而本书作者牛山泉教授是日本著名的风能专家,曾任日本风能协会会长,多年来一直致力于风能的研究和推广,编写过多部有关风能的著作,本书即是他近期的作品。书中从风力发电的发展史讲起,除了对风特性、风资源调查、风力发电基本理论和空气动力学、风力发电系统组成、控制和设计、风能利用的经济性评价以及风能对环境的影响等内容作了介绍外,还针对当今世界风力发电的前沿和热点问题进行了详细的阐述,如风力发电机组的并网和离网连接技术、近海风力发电技术、风力发电认证、风能与其他可再生能源的互补利用等。本书译者多年在日本从事风能研究,期间与牛山泉教授有过多次交流。本书内容翔实、取材新颖,是一本较全面介绍当今最新风能技术的论著。为此将本书译成中文,推荐给广大读者,既可供从事风电行业的工程技术人员参考,也可作为科研院所的科研人员、教师和研究生的教科书及参考书。

本书的第1~3章、第9~12章由刘薇博士翻译,第4~8章由东北农业大学工程学院的李岩副教授翻译。东北农业大学的冯放和李声茂也在翻译中给予了帮助。此外,科学出版社的编辑为本书的出版作了大量的工作,在此表示衷心的感谢。

刘 薇 李 岩
2009年6月

前 言

20 世纪 80 年代初,是日本风能应用的摇篮期。当时,关于风能技术的基础参考书主要是 1979 年欧姆出版社 (Publisher of Science and Engineering Books) 出版的《风能初级读物》一书,该书曾获得了很高的赞誉。本书《风能技术》是该读物的续篇。

本间琢也老师(当时就职于日本电子技术综合研究所) 在主编的《风能初级读物》一书的前言中叙述道:“1977 年,从大学、国家研究所以及民营企业、民间团体聚集了十余名研究人员,举办了多次风能利用可行性的学术研讨。其讨论课题的范围相当广泛,包括日本风能资源存储量、风的特性、风力发电机组的设计条件、风能利用方法以及风能转换系统等。伴随着探讨的深入和风力发电的实际应用,从事与此相关的人员逐渐增加。而且,风能利用的实用性也表明了其对日本有相当重要的意义。当我们结束这一年的学术探讨时,恰逢日本‘阳光计划’实行之日,即正式开始风能利用技术的可行性研究。在此,把所有的基础知识以及新的研究成果归纳总结集结成书,出版发行,为社会作贡献。因此,与其说该书是风能利用技术的完整体系,不如说是今后开发研究的出发点。今后,关心和从事风能利用以及研究开发的人员会越来越多。如果该书能为您或多或少地提供与风能相关的知识,作为编者会感到无限喜悦。”从书中还可以看到,作为国家项目,日本风能是如何研究开发的。

现在,《风能初级读物》的发行已经经历了四分之一一个世纪,随着环境问题的加剧,风力发电事业与风力发电机组产业的迅速兴起,使人们对于风能寄予了更多的希望。本书满足了风能应用的时代要求,解决了对该行业参考书的需求。《风能初级读物》是由 6 位专家共著,而在风能的实际应用时代,因为非常需要大范围、跨学科的研究,特邀了有关日本风能领域的 16 位专家执笔完成该书。该书主要面向能源相关领域,从大专生、大学生、研究生到企业、研究机构等研究技术人员、经营、管理部门的管理人员,还有公共团体与环境、能源相关的计划、政策负责人等。

我是唯一参与旧书和新书编著工作的作者。受本间琢也老师的委托对该书进行了汇总编辑的工作,深感责任重大和任务繁重。尽管新书合著者很多,但各位作者工作繁忙,活跃在第一线上。该书从规划起草开始,经过一年多的编著就能达到

世界一流水平,不得不令人感到惊讶。在此,对于各位作者的努力与合作深表谢意。同时也对欧姆出版株式会社佐藤政次社长以及其同仁表示衷心的感谢。

如果该书在大力倡导环境保护、风能应用的时代,对于那些关心和发展风能事业的读者有所帮助的话,我们深感万分荣幸。特别是各位担负重任的年轻人,通过该书激发其在风能资源应用与研究中的想象力,作者更感到格外欣悦。

牛山 泉

2005 年 8 月

目 录

1 风车和风力发电发展史

1.1	20 世纪以前的风力利用技术	1
1.2	风力发电发展简史	2
1.2.1	风力发电机组诞生的背景	2
1.2.2	风力发电的先驱者	2
1.2.3	以丹麦为中心的风力发电的发展史	3
1.2.4	20 世纪风力发电机组技术的发展	4

2 风的特性和风能资源

2.1	风速功率谱	9
2.2	风速随高度变化	10
2.2.1	对数率分布	11
2.2.2	指数率分布	12
2.3	风速频率分布	12
2.4	风 能	13
2.5	地形和风	14
2.5.1	日本各地由于区域地理环境形成的地形风	14
2.5.2	峡谷风	14
2.5.3	山脉对气流的抬升作用	15
2.6	风况分布图	15
2.6.1	局部地区风况预测模型 LAWEPS	15
2.6.2	风况分布图	16
2.6.3	风速的历年变化	17

3 风力发电机组的布置

3.1 风和风能	20
3.2 风的特性	20
3.2.1 海陆风	21
3.2.2 山谷风	21
3.2.3 季 风	21
3.2.4 高压低压引起的风	22
3.2.5 台 风	22
3.2.6 地理环境形成的地形风	22
3.3 风的统计分析	22
3.3.1 逐时、月、年平均风速	22
3.3.2 风向玫瑰图	24
3.3.3 风速频率分布	24
3.3.4 威布尔分布	24
3.3.5 风功率密度	26
3.4 年发电量	26
3.5 风况数据的利用	28
3.5.1 风况观测站	28
3.5.2 日本的风况分布图	29
3.6 影响风况的各种因素	31
3.6.1 地表面的粗糙度	31
3.6.2 地 形	32
3.6.3 障碍物	32
3.7 风况预测	33
3.7.1 基于风况观测数据进行风况预测的方法	33
3.7.2 利用气象模型进行风况预测方法	35

4 风力发电机组基础理论

4.1 风力发电机组种类与特征	39
4.1.1 风力发电机组分类	39
4.1.2 水平轴风力发电机组和垂直轴风力发电机组	39

4.1.3 升力型风力发电机组和阻力型风力发电机组	40
4.2 风力发电机组转动原理	40
4.2.1 升力与阻力	40
4.2.2 升力型风力发电机组	41
4.2.3 阻力型风力发电机组	42
4.3 风力发电机组的性能评价	43
4.3.1 功率系数	43
4.3.2 力矩系数	43
4.3.3 推力系数	44
4.3.4 叶尖速度比(尖速比)	44
4.3.5 实 度	45
4.4 风力发电机组的理论最大功率	45
4.4.1 升力型风力发电机组的最大功率系数	45
4.4.2 阻力型风力发电机组的最大功率系数	47

5 风力发电机组的空气动力学

5.1 风力发电机组基础理论	49
5.2 水平轴风力发电机组	50
5.2.1 水平轴风力发电机组性能分析与工作原理	50
5.2.2 直径 20m 的水平轴风力发电机组	53
5.2.3 水平轴风力发电机组设计	54
5.3 垂直轴风力发电机组	54
5.3.1 垂直轴风力发电机组分类	55
5.3.2 垂直轴风力发电机组特性	55
5.3.3 风力发电机组性能推导与空气动力学	56
5.3.4 影响风力发电机组性能的因素	59
5.3.5 垂直轴风力发电机组用叶片翼型	61
5.3.6 风力发电机组周围流场	62
5.3.7 关于垂直轴风力发电机组设计	64

6 风力发电系统设计

6.1 概念设计	65
----------------	----

6.1.1 风力发电机组形式	65
6.2 风力发电机组设计注意事项	70
6.2.1 设计标准	70
6.3 安全性与可靠性	73
6.3.1 控制装置与安全系统	73
6.3.2 其他安全注意事项	74
6.3.3 冗余设计	74
6.3.4 安全系统动作后恢复机器运转	74
6.3.5 安全保护装置	75
6.4 载 荷	75
6.4.1 解析条件的规定	75
6.4.2 以 IEC 载荷为基础的解析	76
6.4.3 台风时的风载荷计算条件的具体举例	78
6.5 风力发电系统构成要素	78
6.5.1 叶 片	78
6.5.2 轮 毂	84
6.5.3 动力系统	85
6.5.4 偏航系统	90
6.5.5 叶片桨距可变机构的设计	91
6.5.6 发电机	92
6.5.7 其他机构	97

7 风力发电系统控制

7.1 风力发电机组	114
7.1.1 转数控制	114
7.1.2 方向控制	115
7.1.3 停机控制	115
7.2 发电机与运转方式	116
7.2.1 发电机	116
7.2.2 运转方式	116
7.3 风力发电系统	118
7.3.1 风力发电机组功率系数	118

7.3.2 风力发电机组的功率控制	119
-------------------------	-----

8 风力发电系统

8.1 大规模并网连接	127
8.1.1 发电方式与并网方式	127
8.1.2 《并网连接技术要件指南》与《分散电源并网连接技术指南》	131
8.1.3 高压并网	132
8.1.4 超高压连接	133
8.1.5 欧洲风力发电机组特征	144
8.1.6 日本国内风力发电装机容量的情况	145
8.2 小规模离网型电源	146
8.2.1 小型风力发电机组特征	146
8.2.2 小型风力发电机组的导入形式	149
8.2.3 小型风力发电机组导入的注意事项	154
8.3 能量的储存与稳定(电力稳定装置)	157
8.3.1 频率变动产生原因	157
8.3.2 频率变动(有效功率变动)对策	159
8.3.3 超高速飞轮特性	163
8.3.4 超高速飞轮电力稳定装置特征	165
8.3.5 今后的课题	166
8.4 近海风力发电	167
8.4.1 近海风力发电现状与未来	167
8.4.2 下一代漂浮式近海风力发电系统	175

9 风力利用系统

9.1 风力发电机组最适宜的运行条件	183
9.2 风力提水机种类和特性	183
9.2.1 风力发电机组和水泵组合	185
9.2.2 提水性能	185
9.2.3 风力提水系统的简单推算方法	187
9.3 风力压缩机驱动	188

9.4 风能转换成热能	188
9.4.1 风能转换热能方式的种类和特征	188
9.4.2 风能热转换系统实例	190
9.4.3 风能热转换的未来	192
9.5 风能和其他可再生能源综合利用系统	192
9.5.1 风能和其他可再生能源综合利用系统的特征	193
9.5.2 实 例	193

10 评价利用风能的经济性

10.1 计算预测年发电量	201
10.1.1 利用分组方法计算发电量	201
10.1.2 根据威布尔分布计算发电量	202
10.1.3 实测数据与威布尔分布近似	203
10.1.4 修正预测发电量	204
10.2 长期风况预测	205
10.2.1 年平均风速的变动	205
10.2.2 气候变化	206
10.3 风速随高度分布	207
10.4 校正风速计	208

11 风能利用对环境的影响

11.1 噪 声	209
11.1.1 影响的现状	209
11.1.2 避免和减少噪声影响的对策	210
11.2 电波影响	212
11.2.1 电波影响的现状	212
11.2.2 避免和减少影响的对策	213
11.3 生态系统	214
11.3.1 生态系统影响的现状	214
11.3.2 避免和减少影响的对策	218
11.4 景观影响	219

11.4.1 对景观影响的现状	219
11.4.2 避免和减少影响的对策	221

12 风力发电的展望

12.1 风力发电的标准化和认证	223
12.1.1 风力发电系统标准化过程	224
12.1.2 现有规格概要、审议过程	230
12.1.3 风力发电认证	238
12.2 风力发电未来展望	245
12.2.1 风力发电主要课题	245
12.2.2 风力发电未来展望	247
参考文献	253



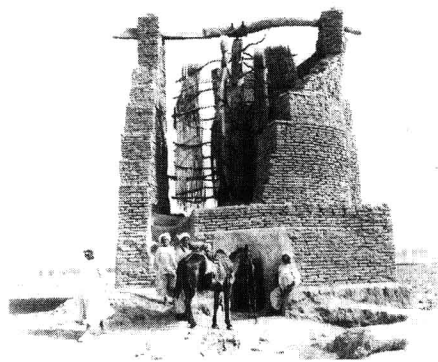
风车和风力发电发展史

风车和水车都是人类早期使用的原动机,在欧洲用于碾磨粮食和抽水已有七百多年的历史。到了 19 世纪末,各国开始利用风力发电。随后,20 世纪以丹麦为中心快速发展的风力发电,由于大型化和引入新的设计观念而进入高性能化的阶段。特别是 1973 年石油危机的出现,开始开发大型风力发电机组。1990 年以后,因为环境污染问题的加剧,人们对二氧化碳等温室气体禁排的呼声越来越高,风力发电在全球进入了一个蓬勃发展的阶段。本章首先概述 20 世纪之前以水车和碾磨粮食的风车为中心的风力利用技术,然后阐述 19 世纪末风力发电初期到 20 世纪初风力发电摇篮期,以及其后的发展期一直到最新风力发电技术采用的过程。

1.1 20 世纪以前的风力利用技术

人类数千年以来,以各种各样的形式利用风能,例如帆船。根据中国和埃及的文献记载,三千多年以前风力机就被使用过。作为可以信赖的文字和图画记录,阿尔·玛斯乌丹记录了第 10 世纪东波斯的锡斯坦地区的风和风力扬水机;阿拉伯的冒险家伊斯塔库里在大约公元 950 年也记载了如图 1.1 所示的,现在阿富汗和伊朗边境附近仍在使用的碾磨粮食的垂直轴风力机。同一时期,据说在埃及以灌溉为目的的风力机也被使用过^[1]。

1105 年法国关于许可制造风力机的文件,证明了风力机在欧洲第一次被使用。欧洲最早的风力机是用来灌溉和扬水,1439 年荷兰制造了最初碾磨粮食用的风力机,此后风力机又经过几个世纪才得到了快速发展。



有关风力机所记载的重要事项, 图 1.1 阿富汗保存至今的古典垂直轴风力机

包括大约公元 1500 年列奥纳多·达·芬奇(Leonardo da Vinci)对风力机的绘画;其后 1665 年英国萨里(Surrey)制造的碾磨机;1745 年英国的埃顿蒙多利和 1750 年的安多留梅依库鲁的发明,即可以自动调节风向的风力机;还有 1759 年被授予英国皇家索萨埃蒂金牌的约翰·斯米顿(John Smieton)的关于风力机及扬水机的研究^[2]。

直到 19 世纪初,据说有一万台以上的风力机在荷兰和英国使用。当时的风力机作为主要的动力源被普及,风力机的直径为 20m,风速为 7m/s 时的最大输出功率可达 20kW,其年平均输出功率大约为 10kW。

19 世纪中期,美国为了发展农业及畜牧业,研制开发了一种轻便的扬水用的多翼型风力机,即使到现在,世界许多地方都还在广泛使用。特别是芝加哥的阿埃隆发电机公司生产的多翼型风力机,到 20 世纪中期就生产了 80 多万台,占据了当时市场份额的一半以上^[3]。

1.2 风力发电发展简史

1.2.1 风力发电机组诞生的背景

19 世纪末风力发电取得了两个重大成果。其一,作为空气动力学的成果,以传统的荷兰风力机为代表,利用升力的高速风力机代替了利用阻力的低速高力矩风力机;其二,作为电气工程学的成果,利用风能发电机得到了实际的应用。而且这时需要电力的需求也变得迫不及待。

自从英国的法拉第(Faraday)在 1831 年发现电磁感应现象后,便开始了发电机的研制开发。1873 年维也纳万国博览会宣告了发电机、电动机、电力输送设备的诞生。19 世纪末是全世界电力事业蓬勃兴起的时期,航空热也很高涨,在此基础上,空气动力学的发展也基本上达到一个成熟阶段。特别是 1903 年莱特兄弟的首次飞行,进一步与高速风力机的开发研究联系了起来。

1.2.2 风力发电的先驱者

一般都认为风力发电的先驱者是丹麦的 Poul la Cour 教授。1891 年他在丹麦 Askov 成立了风力发电研究所,为风力发电王国丹麦奠定了基础^[4]。在英国的文献里叙述了 1887 年 J. Bryce 在 Glasgow 地区利用输出功率 3kW 的垂直轴风力机发电,用电池储存能量,用于照明^[5]。在美国的文献里,1888 年 Cleveland 的 C. F. Brush 使用直径 17m、144 个叶片的大型多叶片风力机进行风力发电,12kW 输出功率可以点燃 350 个白炽灯,直到 1908 年使用了长达 20 年^[1]之久。对于当时技术先进的法国,1887 年沙勒·顿·格瓦依尤公爵在 Le Havre 的近郊做了一个试