

# 风力发电机组

# 设计与技术

邓英 编著



FENGLI  
FADIAN  
JIZU  
SHEJI  
YU  
JISHU



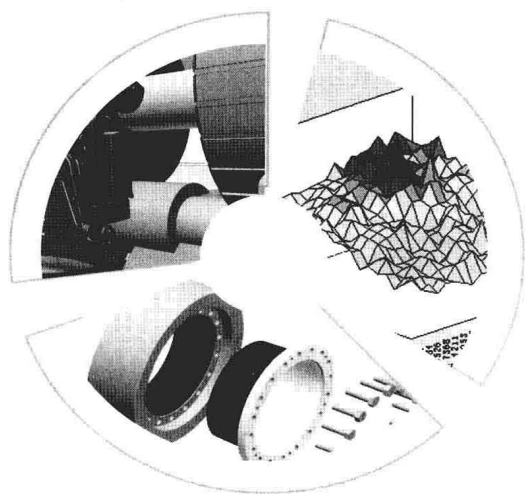
化学工业出版社

# 风力发电机组

# 设计与技术



邓英 编著



化学工业出版社

·北

本书重点阐述了风力发电机组的设计理论与技术,旨在为风力发电技术开发、设备设计人员提供实用的参考与借鉴。全书共分8章,包括绪论、风资源、风力发电原理、风力发电机组设计载荷、风电机组总体设计技术、风力发电机组的结构动力学、风力发电系统模型、风电机组的控制技术。

本书可供从事风电机组设计工作的工程技术人员、研究人员和相关专业的高校师生作为教材或参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组设计与技术/邓英编著. —北京:化学工业出版社, 2011.7

ISBN 978-7-122-11142-5

I. 风… II. 邓… III. 风力发电机-机组 IV. TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第074465号

---

责任编辑:郑宇印

文字编辑:丁建华

责任校对:战河红

装帧设计:韩飞

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张10 字数178千字 2011年9月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:36.00元

版权所有 违者必究



# 前言

**世**界各主要发达国家和发展中国家都在努力发展本国的可再生能源发电技术。风力发电作为可再生能源发电技术的一种重要形式，得到了大力的发展。由于新技术的使用和发电量的增大，使得电能的成本不断下降，促进了更大型、高效率和高可靠性风力发电机组的迅猛发展。然而，随着风电产业深入发展，产生风电的风力发电机组设备的使用寿命受到严峻的挑战，使得一些制造厂家由于质量问题纷纷倒闭或被兼并。人们认识到解决的最好办法是采用可靠的、先进的风电机组设计技术和制造工艺，由第三方认证机构监管风电机组整个制造过程，最终实现风电机组运行寿命 20 年的目标，这也是笔者编著本书的初衷。

本书共由 8 章组成。第 1 章为全书的简介。第 2 章通过风能资源特性、结构和统计学描述风力资源，给出了风能资源统计的数学描述和风流瞬时特性的数学描述形式，对风能特性的理解至关重要，可用在风电机组的载荷计算分析和控制器设计工作中。第 3 章是对风电机组风轮特性的研究，重点研究能量转换过程及风力发电原理，分析流过桨叶的空气产生的动力。桨叶转动即能捕获风能，也能产生应力作用在驱动齿轮传动机构和塔架上。气动负载是风电机组的主要载荷，对机组寿命和电能质量的影响很大，是机组整机和各部件设计的依据。第 4 章介绍了气动负载计算分析方法。第 5 章介绍了风电机组的总体设计技术。为了解风电机组与其他发电设备的区别，全书在第 6 章详细介绍了风电机组的振动特性和分析方法。第 7 章给出了风能转换控制系统的动态特性模型，这是风电机组控制器设计的基础。为获得物理特性的真实情况，风力机被分成了几个子系统，这样，独立的模型推出包括：空气动力模型、桨距制动器、支持结构、驱动齿轮组和发电单元。所有子模型构成完整的风能控制系统模型。在第 8 章里，研究了最常见的风电机



# 前言

组控制技术；探讨了风能控制系统的不同运行方式，包括恒转速、变速、恒桨距、变桨距；给出了风电机组在不同工况的任意风速下的控制方法。重点介绍了线性参数变化增益调度控制器在变速恒桨距和变速变桨距风电机组中的设计。

笔者根据 20 多年来从事风力发电技术研究的工作经验归纳总结成本书编著工作，希望能给广大从事风电机组设计工作的工程技术人员、研究人员和相关专业的高校师生提供参考。本书得到了国家高科技发展计划“风力发电机组设计技术及其工具软件开发”项目 (No. 2006AA05Z429) 的支持。

书中的不妥之处恳请读者批评指正。

邓 英

2011 年 5 月

## 欢迎购买风能与风力发电技术专业科技图书

### ●专业书目

书 名	单价	ISBN 号
风力发电技术丛书——风力机安装、维护与故障诊断	39.0	978-7-122-10274-4
风力发电技术丛书——风力机可靠性工程	68.0	978-7-122-09734-7
风力发电技术丛书——海上风力发电技术	49.0	978-7-122-08322-7
风力发电技术丛书——风力机械技术标准精编	80.0	978-7-122-07298-6
风力发电技术丛书——风力机设计、制造与运行	58.0	978-7-122-06193-5
风能与风力发电技术（第二版）	49.0	978-7-122-07796-7
21 世纪可持续能源丛书——风能开发利用	23.0	978-7-5025-6063-8
风能概论	28.0	978-7-122-06903-0
可再生能源离网独立发电技术与应用（风能/光伏发电篇，学生用书）	78.0	978-7-122-06021-1
可再生能源离网独立发电技术与应用（风能/光伏发电篇，教师用书）	98.0	978-7-122-06001-3
话说新能源丛书——风与风能	25.0	978-7-122-05054-0
替代能源应用技术丛书——风能利用技术	28.0	978-7-122-00225-9
风力 12 在中国	38.0	978-7-5025-7817-X

如需以上图书的内容简介、详细目录以及更多的科技图书信息，请登录 [www.cip.com.cn](http://www.cip.com.cn)。

邮购地址：(100011) 北京市东城区青年湖南街 13 号 化学工业出版社

服务电话：010-64518888, 64518800 (销售中心)

如需出版新著，请与编辑联系。

联系方法：010-64519513 郑宇印



# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 风能转换系统的结构 .....	2
1.2 风力发电技术 .....	2
1.3 风电机组的控制技术 .....	3
1.3.1 风力机的功率调节 .....	3
1.3.2 恒速恒频技术与变速恒频技术 .....	4
<b>第 2 章 风资源</b> .....	<b>5</b>
2.1 我国的风资源分布状况 .....	5
2.2 风的形成 .....	7
2.3 风特性 .....	8
2.3.1 平均风速 .....	8
2.3.2 风能 .....	10
2.3.3 湍流 .....	11
2.4 风电机组的塔影效应 .....	12
2.5 瞬时风速变化模型 .....	13
2.5.1 极端风速模型 (EWM) .....	13
2.5.2 极端运行阵风 (EOG) .....	13
2.5.3 极端风向变化 (EDC) .....	14
2.5.4 极端相关阵风 (ECG) .....	14
2.5.5 方向变化的极端相关阵风 (ECD) .....	15
2.5.6 极端风切变 (EWS) .....	15



# 目 录

<b>第 3 章 风力发电原理</b> .....	16
3.1 风轮转子 .....	16
3.2 风力涡轮空气动力学 .....	17
3.2.1 制动盘模型 .....	17
3.2.2 贝茨极限 .....	19
3.2.3 叶素模型 .....	20
3.2.4 力、力矩和功率 .....	22
3.2.5 流上风轮的风速 .....	24
3.3 稳恒湍流 .....	25
3.3.1 风剪效应 .....	25
3.3.2 塔影效应 .....	26
3.3.3 随机湍流 .....	27
3.4 风力的利用方法——叶片设计 .....	28
3.4.1 风轮叶片特性的计算理论 .....	28
3.4.2 动量-叶素理论推导 .....	29
3.4.3 诱导因子 $a$ 、 $a'$ 的计算方法 .....	30
3.5 风力机性能计算方法 .....	31
3.6 风轮输出特性计算举例 .....	32
3.7 湍流状态下叶素理论修正 .....	35
3.8 叶片设计 .....	36
<b>第 4 章 风力发电机组设计载荷</b> .....	39
4.1 风力机载荷 .....	39





# 目 录

4.1.1	风电机组的载荷工况 .....	39
4.1.2	风轮的气动载荷 .....	41
4.2	重力和惯性载荷 .....	42
4.2.1	重力引起的载荷 .....	42
4.2.2	离心力引起的载荷 .....	42
4.2.3	离心力引起的锥角效应 .....	43
4.3	运行载荷 .....	43
4.3.1	阵风引起的弯曲力 .....	44
4.3.2	风轮的旋转效应 .....	45
4.4	极限载荷 .....	45
4.5	载荷统计外推法 .....	45
4.6	载荷谱 .....	48
4.6.1	雨流法 .....	48
4.6.2	从雨流矩阵到载荷谱 .....	48
4.6.3	等效载荷 .....	48
4.7	风力机设计载荷的计算举例 .....	49
4.7.1	载荷计算准备 .....	49
4.7.2	Bladed 软件载荷的输出 .....	53
4.7.3	载荷分析 .....	56
4.8	载荷计算坐标系及其转换 .....	58
4.8.1	坐标系定义 .....	58
4.8.2	坐标系转换 .....	60



# 目 录

<b>第 5 章 风电机组总体设计技术</b> .....	62
5.1 设计流程 .....	62
5.2 设计工作 .....	65
5.2.1 设计主要内容 .....	65
5.2.2 分析计算工作内容 .....	65
5.3 设计要求 .....	65
5.4 机组的设计流程 .....	66
5.5 设计原则 .....	66
5.6 设计方法 .....	67
5.7 风电机组总体参数设计 .....	68
5.7.1 大型风力发电机组的总体技术参数 .....	68
5.7.2 基本设计参数 .....	69
5.8 风电机组选型设计 .....	71
5.8.1 功率控制方式 .....	71
5.8.2 恒速、双速、变速风力发电机 .....	73
5.8.3 制动系统 .....	74
5.8.4 传动系统 .....	76
5.8.5 润滑系统 .....	78
5.8.6 风轮和塔架间的相对位置确定 .....	79
5.8.7 塔架 .....	79
5.9 风力发电机组的总体布局设计 .....	80
5.9.1 风力发电机组的总体布局基本形式 .....	80
5.9.2 大型兆瓦级风电机组几种主要的布置形式 .....	82



# 目 录

<b>第 6 章 风力发电机组的结构动力学</b> .....	85
6.1 模态分析法 .....	85
6.2 结构模态分析理论 .....	86
6.3 系统响应的求解 .....	88
6.3.1 单自由度振动系统响应 .....	88
6.3.2 任意激励的响应 .....	89
6.4 风电机组的振动 .....	90
6.4.1 叶片摆动所产生振动 .....	90
6.4.2 传动链的摆动 .....	90
6.5 风力发电机组的振动抑制 .....	92
6.5.1 风电机组的模态坐标系下的状态空间形式 .....	92
6.5.2 缩减系统自由度 .....	94
6.5.3 欲配置的极点的确定 .....	98
6.6 系统的极点配置 .....	99
6.6.1 系统的能控性 .....	99
6.6.2 系统极点配置 .....	99
6.7 制动器输出 .....	100
6.8 实现方法 .....	100
<b>第 7 章 风力发电系统模型</b> .....	102
7.1 风力发电机组的模型 .....	102
7.2 机械子系统——传动系统 .....	103
7.3 气动子系统——风轮气动特性 .....	106



# 目 录

7.4 电气子系统 .....	106
7.4.1 直接耦合的鼠笼式感应电机 .....	106
7.4.2 控制定子的鼠笼式感应发电机 .....	108
7.4.3 控制转子的双馈感应发电机 .....	108
7.5 桨距子系统 .....	110
7.6 整个风力发电机组的模型 .....	111
<b>第8章 风电机组的控制技术 .....</b>	<b>113</b>
8.1 风电机组的基本运行过程 .....	113
8.1.1 待机状态 .....	113
8.1.2 风力发电机组的自启动 .....	114
8.1.3 自启动的条件 .....	114
8.1.4 叶轮对风 .....	115
8.1.5 制动解除 .....	115
8.1.6 定桨失速风力发电机组并网与切换 .....	115
8.2 安全保护系统 .....	116
8.3 风电机组常规控制技术 .....	116
8.3.1 变桨距控制技术 .....	116
8.3.2 最佳叶尖速比控制技术 .....	117
8.3.3 变速运行方式 .....	118
8.4 闭环控制技术 .....	120
8.4.1 恒速变距机组闭环控制技术 .....	120
8.4.2 变速机组中的变距控制技术 .....	122



# 目 录

8.4.3 转矩控制和变距控制之间的转换 .....	122
8.4.4 塔架振动控制 .....	123
8.4.5 驱动链扭转振动控制 .....	124
8.4.6 独立变距控制 .....	124
8.5 数字 PID 控制算法 .....	125
8.5.1 位置式 PID 控制算法 .....	125
8.5.2 增量式 PID 控制算法 .....	126
8.6 变速恒频控制技术 .....	127
8.7 优化反馈控制方法 .....	128
8.8 增益调度控制技术 .....	129
8.8.1 传统的增益调度设计方法 .....	130
8.8.2 基于 LPV 的增益调度设计方法 .....	131
8.8.3 变速变桨风力发电机组 LPV 模型 .....	132
8.9 凸多面体结构的 LPV 控制器设计 .....	133
8.9.1 凸分解 LPV 模型 .....	133
8.9.2 仿真研究 .....	137
<b>附录 风电机组机械子系统模型推导 .....</b>	<b>140</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>144</b>



— — — — —

# 第 1 章

## 绪 论



古时候，有很多风能的开发利用方式，主要用风能来研磨稻谷和抽水取水。随着工业时代的到来，风能逐渐被化石燃料所取代，风车也限于农业灌溉抽水之用。到了 20 世纪，新的设计发明促使小容量发电技术产生，并用于给电池充电。20 世纪 70 年代早期的石油危机之后，风能技术经历了一次革命。由于油价激增，很多国家提出了极具雄心的风能研究开发计划。结果使新材料和现代风力机的设计发展起来了，并由此开创了大规模风力发电的时代。在过去的二十年间，不断增强的环境意识和能源多样化的趋势更是加强了人们开发风能的兴趣。

现代工业的发展带来了巨大的能源消耗。工业革命以来形成的以煤、石油、天然气等传统化石能源为主的能源结构难以为继。为了人类社会的可持续发展，当务之急是寻找和研究利用其他可再生的替代能源。

根据世界风能协会的报告，2009 年，全世界风电累计装机容量达到 159213MW，其中新增装机容量达 38312MW，比 2008 年新增 31.7%，为 2001 年以来增长最快的一年，全球风电装机容量继续保持每三年翻一番的增长势头。

我国风力发电起步晚，发展速度快。1986 年，通过引进丹麦的风电技术，山东荣成建立了我国第一个并网风力发电场。此后，我国政府先后颁布了许多鼓



励风电的政策法规，促进风力发电的发展。特别是2005年2月28日第十届全国人民代表大会常务委员会第十四次会议上通过了《中华人民共和国可再生能源法》，其中明确规定：国家实行可再生能源发电全额保障性收购制度。2009年7月20日，国家发改委发布了《关于完善风力发电上网电价政策的通知》，按风能资源状况和工程建设条件，将全国分为四类风能资源区，相应制定风电标杆上网电价。这些政策极大地推动了我国风力发电行业的发展，风力发电相关技术水平迅速提高，风电行业产业链日趋完善，装机容量也迅速上升。据统计，截至2010年年末，全国风电装机容量已达41070MW，居世界第一。

## 1.1 风能转换系统的结构

风能转换系统必须与连续变化的风力相一致并在必要时加以控制。为防止过载损伤风力机，人们加入了一些机械装置来限制高风速时所捕获的风能。其中一种方法是：当捕获能量近似于额定值时，为了降低桨叶的升力，发明了桨距控制法，风轮由机电或液压装置沿纵向驱动旋转全部或部分叶片实现节距调整，也叫主动控制载荷法。另外，还有被动的控制策略，就是在硬件上研制的新方法，也就是基于桨叶上的特殊设计，引起额定或更高风速下的失速现象。在高风速时产生湍流，进而产生较强阻力及损失部分升力使气动力矩减小。尽管硬件结构简单，但失速控制的风能转换系统会减少风能的捕捉量，并且存在使风力机疲劳损伤的高风险。

直接联网的电力发电机组在风能转换系统中，风力机转速受电网频率约束。虽然成本低而且可靠性高，但这些恒转速设置很难根据风速的变化来调整。为了更好地利用风力机桨叶，变速恒频风电机组随之发展起来。加入电力电子变流器作为发电机和交流电网的接口，将电网运行频率和风力机转速分离解耦。这样的系统同样包括由额定转速决定的最优转速率，由此控制转速。此外，电力电子变流器可以根据系统对能量的需要重新分配电能。所以，市场上出现了两种主流机型——双馈式变速恒频风电机组和直驱永磁式变速恒频风电机组。这就是目前技术的不断发展与进步最终确定的风能转化系统的结构形式。当然，随着新技术突破还会出现新的结构形式的风力发电机组。

## 1.2 风力发电技术

风力发电技术是涉及空气动力学、自动控制、机械传动、电机学、力学、材料学等多学科的综合性和高技术系统工程。能够实现风力发电，并能进行气动到机械和磁电转化的装置称为风力发电机组。风力发电机组必须进行专业化的工程设



计和加工制造,才能担当起风能转化为电能的功能。风力发电技术涵盖了风能转化为电能的理论应用、风电机组的设计、制造和运行控制的整个过程。

## 1.3 风电机组的控制技术

风能转化系统发电运行是由控制系统实现的,是风力发电系统的核心技术,与风电机组的发展过程一样,风电机组的控制技术的发展也经过了定速定桨、定速变桨、变速变桨的三个阶段。目前在风能发电领域,研究难点和热点集中在风电机组大型化、风力发电机组的先进控制策略和优化技术等方面。控制技术是风力发电机组安全高效运行的关键技术。

风力发电就是将风能转换为机械能进而将机械能转换为电能的过程,其中风轮将风能转换为机械能;发电机及其控制系统将机械能转换为电能。风电机组控制系统作为风力发电系统的关键部件之一,直接影响着整个风力发电系统的性能、效率。风力机的变桨距功率调节技术和发电机的变速恒频发电技术构成了风力发电机组的控制技术,这也是风力发电技术的发展趋势。

### 1.3.1 风力机的功率调节

功率调节是风力机的关键技术之一,目前投入运行的机组主要有两类功率调节方式:一类是定桨距失速控制,另一类是变桨距控制。

#### (1) 定桨距失速控制

定桨距是指桨叶根部与轮毂采用刚性连接,即桨叶的安装角(或称节距角)固定。定桨距风电机组常采用双速发电机,当低于额定风速时,低转速的小电机运行,以追求最佳的风能利用效率;当高于额定风速时,桨叶的攻角会增大,同时产生较大的涡流,使风轮效率降低,发生“失速”,以限制发电机的输出功率。定桨距控制方法简单可靠,但定桨距桨叶片较重(与变桨距桨叶片比较),且控制效果依赖桨叶的气动特性,高风速时输出功率下降严重。

#### (2) 变桨距控制

变桨距是指桨叶根部与轮毂采用可承受径向载荷的轴承连接,桨叶的安装角可由变桨距机构调节。与定桨距相比,变桨距控制具有很多优点:a. 通过改变安装角,可获得较大的启动扭矩和制动扭矩;b. 机组并网运行过程中,可跟随风速变化调节安装角的大小,控制风轮的气动扭矩,以实现稳定机组输出功率的目的;c. 风速特别大时,可调节桨叶处于顺桨位置,使桨叶和塔架受力情况大为改善。





### 1.3.2 恒速恒频技术与变速恒频技术

风电机组并网发电时，必须保证输出电能的频率与电网频率一致，即频率恒定。恒速恒频技术是指不管风速怎样变化，保持发电机转速、风轮转速不变，并输出恒频的电能。由于结构简单，技术可靠，恒速恒频技术被广泛应用于中小型风电机组，而大型风电机组正逐步过渡到采用变速恒频技术。

变速恒频技术是指发电机转速（风轮转速）随风速变化而改变，然后通过电力电子控制方法得到固定频率的电能。变速恒频风电机组的运行特点是风轮和发电机转速可以在很大范围内变化而不会影响输出电能的频率，这样，可调节风力机的叶尖速比始终处于最佳值，从而最大限度地利用风能。目前，大型机组常用的变速恒频方案有两种，即双馈异步发电机组成的变速恒频系统和永磁同步发电机组成的变速恒频系统。