

风力发电技术 及其MATLAB与 Bladed仿真

• 孔屹刚 著



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



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

风力发电技术及其 MATLAB 与 Bladed 仿真

孔屹刚 著

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书对大型风力机特别是兆瓦级水平轴三桨叶风力机的工作原理、基本组成、发展趋势作了概述,对当前风电研究的热点和难点,例如风和风速、风力机载荷计算、风力机主要组成部件建模、电气和液压变桨执行机构设计与建模、变桨控制策略、风电场监控与数据采集等进行了深入的理论研究。在此基础上,对当前风电研究常用的两个仿真软件 MATLAB/Simulink 和 GH Bladed 作了介绍,并考虑 MATLAB/Simulink 和 GH Bladed 两个软件各自的优缺点,结合相关理论知识作了详细的仿真研究和分析。

本书不仅对风电领域的科研工作人员的理论研究具有很大的指导、帮助作用,而且对实际风电工程应用人员来说也是一个很好的学习和参考工具。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电技术及其 MATLAB 与 Bladed 仿真 / 孔屹刚著. —北京:电子工业出版社, 2013.11
ISBN 978-7-121-22002-9

I. ①风… II. ①孔… III. ①风力发电—计算机仿真—Matlab 软件 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 281731 号

责任编辑:刘海艳

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

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:720×1 000 1/16 印张:14.75 字数:314.4 千字

印 次:2013 年 11 月第 1 次印刷

印 数:2 500 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。

前 言

能源生产利用对生态环境产生的损害,是中国环境问题的核心。大量直接燃煤造成的大气污染,过度消耗生物资源引起的生态环境破坏,以及温室气体排放是其主要的问题。因此,我国政府把开发无污染的可再生能源作为国家能源可持续发展战略的重要组成部分。同时随着煤炭、石油等能源的逐渐减少,人类越来越重视可再生能源的利用。风能在转换成电能的过程中,只降低了气流的速度,没有给大气造成任何污染。用风力发电,可减少常规能源的消耗,从而减少温室气体的排放,对保护环境和生态平衡,以及改善能源结构具有重要意义。风力发电是可再生能源中最廉价、最有希望的能源,而且是一种不污染环境的“绿色能源”。

经过潜心研究、国外引进、技术交流、单机研制、重点攻关、样机运营、市场推广等几个重要发展阶段,我国风力发电开发在科研水平、设备制造、风场运行等方面已经初具规模,取得了明显的经济效益和社会效益。然而,虽然我国是最早利用风能的国家,但是风力发电技术特别是理论研发方面起步较晚,目前与世界先进风力发电技术相比还存在不小差距。

在风力机运行当中,风向和风速是时刻在变化的,所以风能具有能量密度低、随机性和不稳定性等特点,且风力发电场大多集中在拥有巨大风能资源的高山、荒野、海滩、海岛等偏远地区,其工作自然环境十分恶劣。其次,风力发电机组是涉及机械、电力、电子、液压、控制、计算机、空气动力学等多学科的综合性高技术系统工程,在真实的风力机上进行实验研究,需要耗费大量的人力、物力、财力。最后,随着风力发电在世界的广泛应用,为降低风力发电成本、提高风能利用效率,风力机单机容量越来越大,同时风力机输出电能到与之相连的电网,这都给实验操作人员的人身安全,以及实验不当给整个电网的安全带来安全隐患。因此单纯依靠传统的物理实验研究手段对风力发电研究来说是不可行的,仿真技术因不受气象条件的限制,且投入低、安全性高等优点,逐渐在风力发电机组的研究和测试领域得到了越来越广泛的应用。

目前有很多用于风力发电研究的仿真软件,其中主要有 MATLAB/Simulink 和 GH Bladed。MATLAB/Simulink 和 GH Bladed 各有侧重点,在 MATLAB 中,风力机各组件可以通过编程或通过 Simulink 库模块搭建模型来实现仿真;GH Bladed 软件偏重于风力机的载荷计算,在 Bladed 软件中,风力机各组件可以通过打开的工具图标界面,进行参数设置来完成仿真。本书分为 10 章,内容包括风力机原理和结构、MATLAB 基础、Bladed 基础、风和风速、风力机载荷分析与计算、变速变桨距水平轴风力机仿真、电气伺服变桨执行机构、液压伺服变桨机构、风力机功率控制策略、

风电场监控与数据采集系统仿真等。在此基础上,借助 MATLAB/Simulink 和 GH Bladed 仿真软件,通过大量实例对相关理论知识点,作了详细的仿真研究和分析。

2005 年前后,风力发电在中国获得了前所未有的高度重视和快速发展,也从那时起作者在上海交通大学开始攻读博士学位,并开始了风力发电的科学研究工作,可以说作者是伴随中国风电的高速发展一路走来。本书内容是作者在博士、博士后期间风力发电技术研究的心血和结晶,在此期间,作者得到了博士生导师上海交通大学王志新教授、博士后流动站导师上海交通大学王杰教授、工作站导师江苏自动化研究所顾浩研究员的悉心指导和帮助,在本书成稿之际,作者愿借此机会向他们致以衷心的感谢!另外,博士后工作期间,作者得到了连云港杰瑞电子公司的徐大林总经理、方纪村副总经理、风电事业部陈建华部长等同事在科研方面的大力支持和帮助,在此也向他们表示衷心的感谢!本书的撰写还得到了硕士研究生牛硕丰、张少帅的帮助,在此也向他们表示感谢!

感谢电子工业出版社工作人员的热情帮助,没有他们的辛勤工作,本书也不可能这样快与读者见面!

在撰写本书期间,作者得到了山西省自然科学基金(No.2013011023-5)和太原科技大学博士启动基金(No.20122029)的大力支持,作者也借此机会向山西省自然科学基金委和太原科技大学有关部门表示感谢!

限于作者水平,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正!

作者

2013 年 11 月

目 录

第 1 章 风力机原理和结构	1
1.1 风力机的工作原理	1
1.2 风力机的主要类型	3
1.3 风力机的发展趋势	6
1.4 风力机的仿真技术	8
第 2 章 MATLAB 基础	10
2.1 MATLAB 基础	10
2.1.1 MATLAB 介绍	10
2.1.2 MATLAB 的系统开发环境	12
2.1.3 MATLAB 计算基础	14
2.1.4 MATLAB 程序设计基础	17
2.1.5 MATLAB 常用命令	19
2.1.6 MATLAB 绘图基础	19
2.2 Simulink 基础	20
2.2.1 Simulink 介绍	20
2.2.2 Simulink 工作环境	21
2.2.3 SimPowerSystems 工具箱	31
2.2.4 SimHydraulics 工具箱	33
第 3 章 Bladed 基础	36
3.1 GH Bladed 介绍	36
3.2 GH Bladed 的系统开发环境	36
3.2.1 工具条菜单	37
3.2.2 工具图标	37
3.2.3 操作顺序	45
3.2.4 输入数据	46
3.2.5 输入数据使用项目文件	46
3.2.6 输入数据进行计算	46
3.2.7 生成报告	47
3.2.8 用户自定义选项	47
3.2.9 实时帮助	47

第 4 章 风和风速	48
4.1 风特性	48
4.1.1 风力等级	48
4.1.2 风速与风级的关系	50
4.1.3 风的测量	50
4.1.4 风能资源的统计计算	51
4.2 风的建模	52
4.2.1 三维湍流模型	52
4.2.2 风剪切模型	53
4.2.3 塔影效应模型	53
4.2.4 基于 MATLAB 的风剪切和塔影效应风速模型	54
4.2.5 基于 Bladed 的三维湍流风速模型	61
第 5 章 风力机载荷分析与计算	67
5.1 风力机载荷情况	67
5.1.1 载荷分类	67
5.1.2 载荷情况	68
5.2 风力机坐标系选择	69
5.3 风力机气动载荷	70
5.3.1 动量理论	70
5.3.2 叶素理论	71
5.3.3 动量-叶素理论	72
5.3.4 空气动力载荷计算	73
5.4 基于 MATLAB 的气动载荷计算仿真	74
5.4.1 不考虑方位角变桨载荷计算	74
5.4.2 考虑方位角气动载荷计算	79
5.5 基于 Bladed 的稳态运行载荷计算	85
第 6 章 变速变桨距水平轴风力机仿真	94
6.1 叶轮模型	94
6.1.1 叶片的几何参数	95
6.1.2 叶轮的几何参数	96
6.2 塔架模型	97
6.3 传动链模型	98
6.3.1 定速模型	99
6.3.2 刚性轴模型	99
6.3.3 柔性轴模型	99

6.4	双馈感应发电机	99
6.4.1	双馈感应发电机工作原理	99
6.4.2	双馈感应发电机多变量数学模型	101
6.4.3	双馈感应发电双馈感应发电机 $dq0$ 坐标变换下数学模型	104
6.4.4	双馈感应发电机在 $dq0$ 同步旋转坐标变换下按定子磁场定向的数学模型	105
6.5	双向 PWM 变换器功率控制模型	106
6.6	基于 SimPowerSystem 风力机仿真	109
第 7 章	电气伺服变桨执行机构	117
7.1	变桨执行机构	117
7.2	电气变桨执行机构	118
7.3	三闭环直流电动变桨仿真	120
7.3.1	主要参数计算	120
7.3.2	基于系统动态结构图仿真	121
7.3.3	基于 SimPowerSystem 仿真	131
第 8 章	液压伺服变桨机构	135
8.1	液压变桨执行机构	135
8.1.1	液压变桨执行机构工作原理	135
8.1.2	曲柄连杆机构	136
8.2	基于系统动态结构图仿真	137
8.2.1	液压变桨执行机构传递函数	137
8.2.2	变桨距液压系统设计	139
8.2.3	仿真研究	142
8.2.4	稳定性分析	144
8.3	基于 SimHydraulics 仿真	145
8.3.1	主要参数计算	145
8.3.2	仿真研究	147
8.3.3	稳定性分析	149
第 9 章	风力机功率控制策略	152
9.1	风力机最大能量捕获策略	152
9.1.1	最大能量捕获策略	152
9.1.2	PID 控制策略	153
9.1.3	仿真研究	154
9.2	风电机组模糊滑模变结构控制技术	161
9.2.1	模糊控制技术	161
9.2.2	滑模变结构控制技术	166

9.2.3	风电机组模糊滑模变结构控制技术	168
9.2.4	仿真研究	170
9.3	分层多模最优控制策略	175
9.3.1	bang-bang 控制策略	177
9.3.2	变速模糊控制策略	179
9.3.3	变桨自适应 PID 控制策略	180
9.3.4	仿真研究	180
9.4	独立变桨控制	185
9.4.1	独立变桨控制与风机功率	186
9.4.2	独立变桨控制策略	186
9.4.3	仿真研究	188
9.5	Bladed 功率控制	192
9.5.1	功率控制	192
9.5.2	高级控制	193
9.5.3	外部控制器	194
9.5.4	功率控制仿真	195
第 10 章	风电场监控与数据采集系统仿真	199
10.1	风电场系统组成	199
10.1.1	风电场中风力发电机组的选择和安装	199
10.1.2	风电场监控系统组成	201
10.2	IEC 61400-25 标准信息模型和通信映射方式	203
10.2.1	风电场监控通信要求和通信模型	203
10.2.2	风电场监控通信协议映射	206
10.2.3	风电场映射方式的选择	208
10.3	OPC 接口规范与数据访问	210
10.3.1	OPC 技术规范	210
10.3.2	OPC 数据访问方法	211
10.3.3	OPC 接口规范解析	212
10.4	基于 OPC 技术的风电场监控系统仿真	214
10.4.1	OPC 技术在风电场监控中的应用	214
10.4.2	风电场监控系统软件平台	214
10.4.3	风电场监控系统仿真	216

第 1 章 风力机原理和结构

1.1 风力机的工作原理

风力发电是利用风能来发电，风力机是将风能转化为电能的机械。水平轴风力机组的主要组成结构如图 1-1 所示。

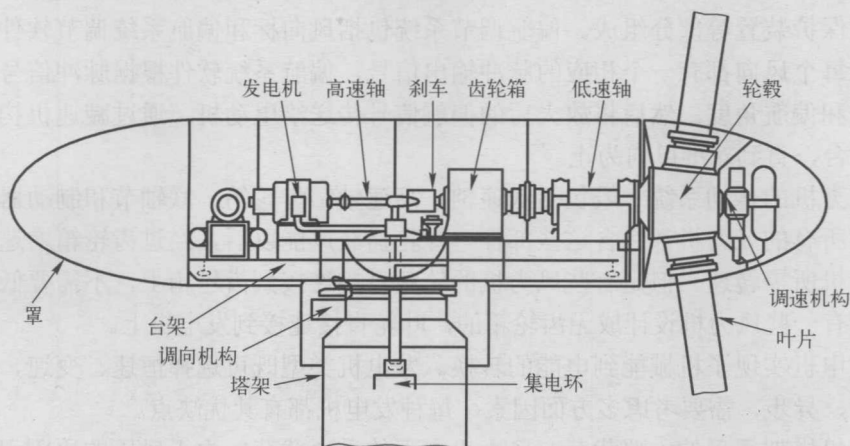


图 1-1 水平轴风力发电机组的主要组成结构

由图 1-1 可以看出目前广泛使用的水平轴风力发电机组主要由叶轮、调速或限速装置、偏航系统、传动机构、发电机系统和塔架等组成。

叶轮是现代大型风力机最主要的部件，由轮毂及均匀分布安装在轮毂上的若干叶片所组成。叶片具有良好的空气动力外形，在气流作用下能产生空气动力使叶轮旋转，将风能转换成机械能。小型风力机的叶片部分大多采用木质材料制成，中、大型风力机的叶片都采用玻璃纤维或高强度复合材料制成。叶片受到的风能作用力，通过轮毂传递到传动系统，进而传递到发电机。轮毂是叶轮的枢纽，除了固定叶片外，还是叶片与主轴的连接件，此外，控制叶片变桨距的执行机构也安装在轮毂中，因此要求轮毂能够承受较大载荷。

不像小型风力发电机，大型风力机的叶轮转动相当慢。比较简单的风力机是采用固定速度的。通常采用两个不同的速度：在弱风下用低速，在强风下用高速。这些定速风力机的感应式异步发电机能够直接发出与电网频率相同的交流电。目前，比较新型的设计一般是可变速的。利用可变速操作，叶轮的空气动力效率可以得到改善，从而提取更多的能量，而且在弱风情况下噪声更低。因此，变速的风力机设

计比起定速风力机,越来越受欢迎。

调速或限速装置从工作原理上可以分为三类:一类是使叶轮偏离主风向,另一类是利用气动阻力,第三类是改变叶片的桨距角。调速或限速装置是为了使叶轮转速始终保持在恒定转速或者不超过某一特定值,不受风速的影响。当风速过高时,该装置可以用来限制功率,并减少作用在叶片上的力,既保证了有效的捕获风能,产生质量较好的电能,又在一定程度上避免了高风速对风机的破坏性影响。

大型风力发电机组大都采用了风向跟踪系统,即偏航系统,使叶轮能够根据风向跟踪系统的指示对准主风向。整个偏航系统由电动机及减速机构、偏航调节系统和扭缆保护装置等部分组成。偏航调节系统包括风向标和偏航系统调节软件。风向标对应每个风向都有一个相应的脉冲输出信号,偏航系统软件根据脉冲信号确定偏航风向和偏航角度,然后将放大后的偏航信号传送给电动机,通过减速机构转动风力机平台,直到对准风向为止。

风力机的传动系统一般包括低速轴、高速轴、齿轮箱、联轴节和制动器等。但并不是所有的风力机都包含这些部件。叶轮捕获风能以后,经过齿轮箱增速以后达到发电机所需转速。但是有些风力机的轮毂直接连接到齿轮箱上,不需要低速传动轴,也有一些风力机设计成无齿轮箱的,叶轮直接连接到发电机上。

发电机实现了机械能到电能的转换。发电机类型既可选择恒速、变速,又可选择同步、异步,需要考虑多方面因素,每种发电机都有其优缺点。

风机塔架承受的主要载荷有风力机向下的重力载荷、由于风压的原因引起的塔架向风的下风向弯曲的载荷以及风力机运行中的动载荷,因此它的刚度和风力机所受的载荷密切相关。塔架的重要性可以说是非常重要的,对于塔架的结构和刚度有非常严格的要求。大型风力发电机组的塔架基本上是锥形圆柱钢塔架。

设于塔底的变压器(或者有些设于机舱内)可提升发电机的电压到配电网电压。所有风力机的功率输出是随着风力而变的。强风下最常见的两种限制功率输出的方法(从而限制叶轮所承受压力)是失速调节和桨距角调节。使用失速调节的风力机,超过额定风速的强风会导致通过叶片的气流产生扰流,令叶轮失速。当风力过强时,叶片尾部制动装置会动作,令叶轮刹车。使用桨距角调节的风力机,每片叶片能够以纵向为轴而旋转,叶片攻角随着风速不同而改变,从而改变叶轮的空气动力性能。当风力过强时,叶片顺桨即叶片转动至与来流方向接近平行,从而令叶轮刹车。叶片中嵌入了避雷条,当叶片遭到雷击时,可将闪电中的电流引导到地下去。

风力机的运行方式主要有三类。

(1) 离网运行。风力发电机输出的电能经蓄电池蓄能,直接或通过逆变器转换成交流电供应用户使用。这种方式一般用于边远农村、牧区、海岛、边防哨所等电网达不到的地区,解决居民的基本用电问题。发电机单机容量一般为几百瓦到几千瓦。

(2) 联合互补运行。为了弥补风能随机性大且不可控的缺点,提高稳定、持续供电的能力,将风力发电机组同其他发电方式联合互补运行,形成了风力-柴油互补运行、风力-太阳能互补运行和风力-柴油-太阳能互补运行等多种方式,大大提高了供电的可靠性及稳定性,减少了储能装置的容量,有效地降低了运行成本。

(3) 并网运行。风力机与电网相连,通过电网输送电能,既可以单独并网,也可以由多台,甚至成百上千台组成风力发电场,弥补了风能能量密度低的弱点,降低了设备投资和发电成本,成为大规模开发利用风能的最经济有效方式。

1.2 风力机的主要类型

风力发电机组主要由两部分组成:风力机部分和发电机部分。风力机部分将风能转换为机械能,发电机部分将机械能转换为电能。根据风力机部分和发电机部分的不同构造类型,采用的技术方案的不同,以及两者之间的不同组合,可以将风力发电机组进行多种分类。

1. 依据风机旋转主轴的方向分类

依据风机旋转主轴的方向,即主轴与地面的相对位置,可以分为:水平轴风力机,旋转轴与叶片垂直,与地面平行;垂直轴风力机,旋转轴与叶片平行,与地面垂直。

水平轴风力机扫风面积较大,风能利用率较高,经过30多年的快速发展,其技术已经发展得比较成熟,是目前世界上的主流风力机,本书将以水平轴风力机作为主要研究对象。但是由于水平轴风力机自身固有的一些特点,如叶片受力情况复杂、需要偏航系统对风、机舱在塔架顶部不易维修等因素,使得水平轴风力机的制造成本和运营维护成本较高。

垂直轴风力机相对于水平轴发电机,具有安全性高、噪声低、抗风能力强、启动风速低、发电量大的优点,另外,由于垂直轴风力机采用无须齿轮箱和转向机构,因而其运行维护简单,定期(一般每半年)对运转部件的连接进行检查即可。但垂直轴风力发电机却没有像水平轴风力发电机那样在世界范围内形成大规模的商业化,其原因主要在于以下几个方面:

- (1) 与水平轴风力机比较,垂直轴风力机的技术不够成熟;
- (2) 垂直轴风力机的风能利用率低于水平轴风力机;
- (3) 传统的垂直轴风力机启动比较困难,一般不能自行启动,需要外力启动。

2. 依据桨叶受力方式分类

依据桨叶受力方式可以分为“升力型风机”和“阻力型风机”。升力型风机使用空气流过叶片产生的升力作为驱动力,阻力型风机则是利用空气流过叶片产生的

阻力作为驱动力的。由于叶片在旋转过程中,随着转速的增加阻力急剧减少而升力则急剧增大,最终表现为升力型叶片旋转速度快,阻力型叶片旋转速度慢,所以升力型的风力发电机组的效率要比阻力型的高很多。

3. 依据桨叶数量分类

依据桨叶数量可以分为“单叶片”、“双叶片”、“三叶片”和“多叶片”型风机。叶片的数目由很多因素决定,其中包括空气动力效率、复杂度、成本、噪声、美学要求等。风力机叶片(在风向投影)的总面积与风通过叶轮的面积(叶轮扫掠面积)之比称为实度(或称实度比、容积比),是风力机的一个参考数据。单叶片、双叶片和三叶片的叶轮实度比小,是低实度叶轮;多叶片的叶轮实度比高,是高实度叶轮。低实度风力机运转速度较高,大部分通过的气流都推动叶片运转,没经过叶片的仅是少部分,使大部分风能得到利用。多叶片大大增加了气体通过的阻力,气流会分开绕过叶轮流向后方,只有部分气流通过叶片做功,由于阻力大,通过叶片的风速也会降低得较多,所以叶轮实际得到的风功率减少了。单叶片风力机稳定性、可靠性不高,二、三、四叶片是风力机常用的选择,用得最多的是三叶片。

4. 依据风力发电机组叶片对风方向分类

依据风力发电机组叶片对风方向可以分为“上风向风机”和“下风向风机”。这种分类主要针对水平轴式风机。叶轮正面迎着风向称为上风向型风力机,叶轮背顺着风向称为下风向型风力机。上风向风机一般需要有某种调向装置来保持叶轮迎风。而下风向风机则能够自动对准风向,从而免除了调向装置。但对于下风向风力机,由于一部分空气通过塔架后再吹向叶轮,这样,塔架就干扰了流过叶片的气流而形成塔影效应,使性能有所降低。因此大型风机普遍采用上风向方式。

5. 依据功率传递的机械连接方式分类

依据功率传递的机械连接方式可以分为“有齿轮箱型风机”和“无齿轮箱的直驱型风机”。有齿轮箱型风机的齿轮箱安装在叶轮和发电机之间,是风力发电机组的动力传递核心装置。通常叶轮的转速很低,为了使发电机的体积设计得尽可能小,就必须使用齿轮箱提高发电机输入转速,也就是说齿轮箱实现了将风力机转子上的低转速、大转矩变到发电机转子上的高转速、小转矩。由于风力发电机组的特殊工况和系统结构设计,齿轮箱往往是传动过程中的薄弱环节。直驱风力机将叶轮和发电机直接连接在一起,风力机桨叶的转矩可以不通过齿轮箱增速而直接传递到发电机的传动轴。由于没有齿轮箱,所以结构简单,制造方便,维护方便。是否使用齿轮箱要根据具体的工况和对风力发电机组的特殊要求而定。

6. 依据桨叶接受风能的功率调节分类

依据桨叶接受风能的功率调节可以分为“定桨距(失速型)机组”和“变桨距机组”。定桨距(失速型)机组的桨叶与轮毂的连接是固定的,桨叶并不会随着风

速的变化而做相应的改变。定桨距（失速型）机组结构简单，但是遇到风速过大情况下该类型风机需要停止运行，否则容易引起事故。变桨距机组的叶片可以绕叶片中心轴旋转，使叶片攻角可在一定范围内（一般在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ）调节变化，也就是变桨操作，有的风机使用的是3个叶片统一变桨，有的则对3个叶片分别安装变桨机构的独立变桨，其性能比定桨距型提高了很多，但是结构也相对比较复杂。因此需要根据当地的风况和风机的用途，选择是否使用变桨系统，以及是统一变桨还是独立变桨，大型风力发电机组上普遍使用变桨系统，出于对风力发电机组寿命的考虑、减少事故概率和最大程度发出电能，使用独立变桨系统已经成为大型风力发电机组的一种趋势。

7. 依据叶轮转速是否恒定分类

依据叶轮转速是否恒定可以分为“恒速风力发电机组”和“变速风力发电机组”。恒速风力发电机组的设计简单可靠，造价相对较低，维护量较少，可以直接并网，但是其气动效率低，结构载荷高，容易给电网造成电网波动，并从电网吸收无功功率，这样电网就需要额外的增加无功功率。变速风力发电机组的气动效率高，机械应力小，功率波动较小，成本效率较高，支撑结构较轻，但是功率对电压降比较敏感，电气设备的造价相对较高，维护量也较大，该类型风力发电机组现常用于大容量的主力机型上。

8. 依据并网运行的风力发电机组的发电机类型分类

依据并网运行的风力发电机组的发电机类型可以分为“异步发电机型”和“同步发电机型”。只要选择合适的变流装置，这两种机型均可应用于变速运行的风力发电机组上。异步发电机型并网方法有：直接并网和通过晶闸管软并网。异步发电机按照其转子结构的不同又可以分为：“笼型异步发电机”——转子为笼型，结构简单可靠、廉价、易于接入电网，在小、中型机组中得到广泛的使用；“绕线式双馈异步发电机”——转子为线绕型，定子与电网直接连接并输送电能，同时绕线式转子也经过变频器控制向电网输送有功或者无功功率。双馈异步发电机的定子直接投入电网，转子通过四象限交-直-交变换器与电网连接。其实质是通过调节转子电流的频率、相位及功率来调节定子侧输出功率，具有变速范围宽、容量大、有功无功可调等优点。目前大型水平轴风力机发电机主要采用双馈异步发电机。

同步发电机型并网方法有自动准同步并网和自同步并网。同步发电机按照其产生旋转磁场的磁极的类型不同又可以分为：“电励磁同步发电机”——转子为线绕凸极式磁极，由外接直流电流励磁来产生磁场；“永磁同步发电机”——转子为铁氧体材料制造的永磁体磁极，通常为低速多极式，不用外接励磁，简化了发电机结构，因而具有多种优势。

9. 依据风机的输出端电压高低分类

依据风机的输出端电压高低可以分为“高压风力发电机组”和“低压风力发电机组”。高压风力发电机组数据端电压一般在 10~20kV, 甚至 40kV, 这种风力发电机组无须使用升压变压器就可以直接并入电网。高压风力发电机组与直驱型永磁体磁极结构一起组成的同步发电机总体方案是目前风能开发利用中的一种很有发展前途的机型。目前市场上流行的是低压风力发电机组, 该机型的输出端电压为 1kV 以下, 产生的电能并入电网前需要进行升压操作。

10. 依据风机的额定功率分类

依据风机的额定功率可以分为 10kW 以下的小型机、10~100kW 的中型机、100~1000kW 的大型机和 1000kW 的兆瓦级大型机。目前 2MW、2.5MW、3MW、5MW 等风机已经在风电市场上占据一定的地位, 更大功率的风机也正在研制中。

11. 依据塔架的不同分类

依据塔架的不同可分为塔筒式风力机和桁架式风力机。国内外绝大多数风力发电机组采用塔筒式结构, 这种结构的优点是刚性好, 冬季人员登塔安全, 连接部分的螺栓与桁架塔相比要少得多, 维护工作量小, 便于安装和调节。桁架式风力机采用类似电力塔的结构形式。这种结构风阻小, 便于运输; 但组装复杂, 需要每年对桁架的螺栓进行紧固, 工作量很大, 而且冬季爬塔架的条件恶劣。在我国, 这种结构的机型更适合南方海岛使用, 特别是阵风大、风向不稳定的风场, 桁架塔更能吸收风力机运行时产生的扭矩和振动。

兆瓦级三桨叶上风向变速变桨距水平轴风力机是目前风力机设计、制造、研究的热点, 本书将重点围绕它展开理论与仿真研究。

1.3 风力机的发展趋势

世界风力发电技术在逐渐完善, 就其发展趋势而言主要反映在小容量向大容量发展, 陆上风电向海上风电发展, 定桨距向变桨、变速恒频发展, 结构设计向紧凑、柔性、轻盈化发展等方面。

1. 大型化

风机机组单机容量大型化是世界风能发展的共同趋势, 目前国际主流机型都在 1MW 以上, 单机容量最大可以达到 5MW, 美国已经研制成功 7MW 风力机, 而英国正在研制 10MW 的巨型风力机。专家们预言, 风力发电机的制造技术将由造机器向造电站方向转化, 现在世界上兆瓦级的风电机组已具备了商业化价值, 其单机容量可达 2~3MW。中国《国家能源科技“十二五”规划》着重提出了风机大型化要求, 未来 5 年要研制出具有自主知识产权的 6~10MW 陆地(近海)变速恒频风电机组。

组（双馈式和直驱式）的整机制造技术。

2. 海上风电

海上风电具有风资源持续稳定、风速高、发电量大、不占用土地资源等特点，且海上风电靠近经济发达地区，距离电力负荷中心近，风电并网和消纳容易，可以进行批量、规模化生产，从而降低风力发电的成本。因此，发展海上风电已成趋势。许多国家都制订了大规模开发利用计划，以获得更佳的效果。2002 年欧盟提出的新目标是：到 2010 年风力发电达到 4000 万千瓦，其中海上风力发电达到 500 万千瓦；2020 年风力发电达到 15 000 万千瓦，其中海上风力发电达到 5000 万千瓦；要求风力发电装机占整个欧盟发电装机的 15%以上。

我国陆上风能储量约 2.5 亿千瓦，海上风能储量约 7.5 亿千瓦，有着最丰富的海上风能资源。海上丰富的风能资源和当今技术的可行性，预示着海上风电场将成为一个迅速发展的市场。从世界范围来看，经过十多年的发展，海上风电技术已经比较成熟，海上风电已经成为欧洲国家未来发展风电的主要方向。然而，相对于陆上风电，海上风电场建设不仅技术难度大、施工困难，而且还要面临海上浮冰、台风等一系列不可控制因素带来的风险。

3. 变速运行

与恒速运行的风力发电机组相比，变速运行的风机可以按照捕获最大风能的要求，在风速变化的情况下实时地调节风力机转速，使之始终运行在最佳转速上，具有发电量大、对风速变化的适应性好、生产成本低、效率高等优点。

4. 变桨距

定桨距在向变桨距方向发展。变桨距调节的优点是机组启动性能好，输出功率稳定，机组结构受力小，另外在风速高于切出风速时，还可使桨叶顺桨，保护风机不受到损坏以增加风机的使用寿命。但其缺点是因增加了变桨装置，从而增大了故障概率，控制程序比较复杂。

5. 无齿轮箱（直驱式）

直驱永磁风力发电机取消了沉重的增速齿轮箱，发电机轴直接连接到叶轮轴上，转子的转速随风速而改变，其交流电的频率也随之变化，经过置于地面的大功率电力电子变换器，将频率不定的交流电整流成直流电，再逆变成与电网同频率的交流电输出。国际先进的无齿轮箱直驱风力发电机，多沿用低速多极永磁发电机，并使用一台全功率变频器将频率变化的风电送入电网。

直接驱动式风力发电机组由于没有齿轮箱，零部件数量相对传统风电机组要少得多。由于采用无齿轮箱的直驱方式有效地提高了系统的效率以及运行的可靠性，无齿轮箱系统的市场份额迅速扩大。

6. 提高可靠性

尽管风电机组技术近年来有了长足的进步,但是从技术商业化程度看,风电机组寿命较短,难以保证技术使用寿命达到 20 年。因而有必要改进所有部件,尤其是转子的可靠性。这可以通过风机系统的优化设计、选用更好的材料、部件、可变速转子、先进的控制装置来实现。这些改进不仅可以减轻负荷,而且还可以减轻风机的重量和降低不同部件的费用。

风力发电正成为各国争相发展的新兴能源。随着石化能源的日益枯竭,风能资源以其蕴量巨大、可以再生、分布广泛、没有污染等优点在世界各国迅速发展。虽然风能资源还有密度低、不稳定、地区差异大等缺点,但是并不能阻挡它快速发展的强劲势头。

1.4 风力机的仿真技术

系统仿真是根据被研究的真实系统的数学模型研究系统性能的一门学科,现在尤指利用计算机去研究数学模型行为的方法。计算机仿真的基本内容包括系统、模型、算法、计算机程序设计与仿真结果显示、分析与验证等环节。在系统仿真技术的诸多环节中,算法和计算机程序设计是很重要的环节,直接决定问题是否能够正确地被求解。

在风力机运行当中,风向和风速是时刻在变化的,所以风能具有能量密度低、随机性和不稳定性等特点,且风力发电场大多集中在拥有巨大风能资源的高山、荒野、海滩、海岛等偏远地区,其工作自然环境十分恶劣。其次,风力发电机组是涉及机械、电力、电子、液压、控制、计算机、空气动力学等多学科的综合性高技术系统工程,在真实的风力机上进行实验研究,需要耗费大量的人力、物力、财力。最后,随着风力发电在世界范围的广泛应用,为降低风力发电成本、提高风能利用效率,风力机单机容量越来越大,同时风力机输出电能到与之相连的电网,这就给实验操作人员的人身安全和因实验不当给整个电网的安全带来安全隐患。因此单纯依靠传统的物理实验研究手段对风力发电研究来说是不可行的,仿真技术因不受气象条件的限制,且投入低、安全性高等优点,逐渐在风力发电机组的研究和测试领域得到了越来越广泛的应用。

20 世纪 80 年代初,国外学者开始将仿真方法用于风电机组的性能研究,其后,仿真技术在风力发电系统的应用范围逐渐拓展。目前,从风电关键设备和控制系统的设计、制造、性能测试与研究,到风电机组或风电场计算、运行、分析等各个方面均有仿真技术的应用,主要的研究方向整理如下。

(1) 风能特性仿真,反映风能的位置分布、时间变化特性、空气动力载荷大小等。风特性仿真结果将用于风力发电机组或风电场的仿真分析中,是风电仿真研究