

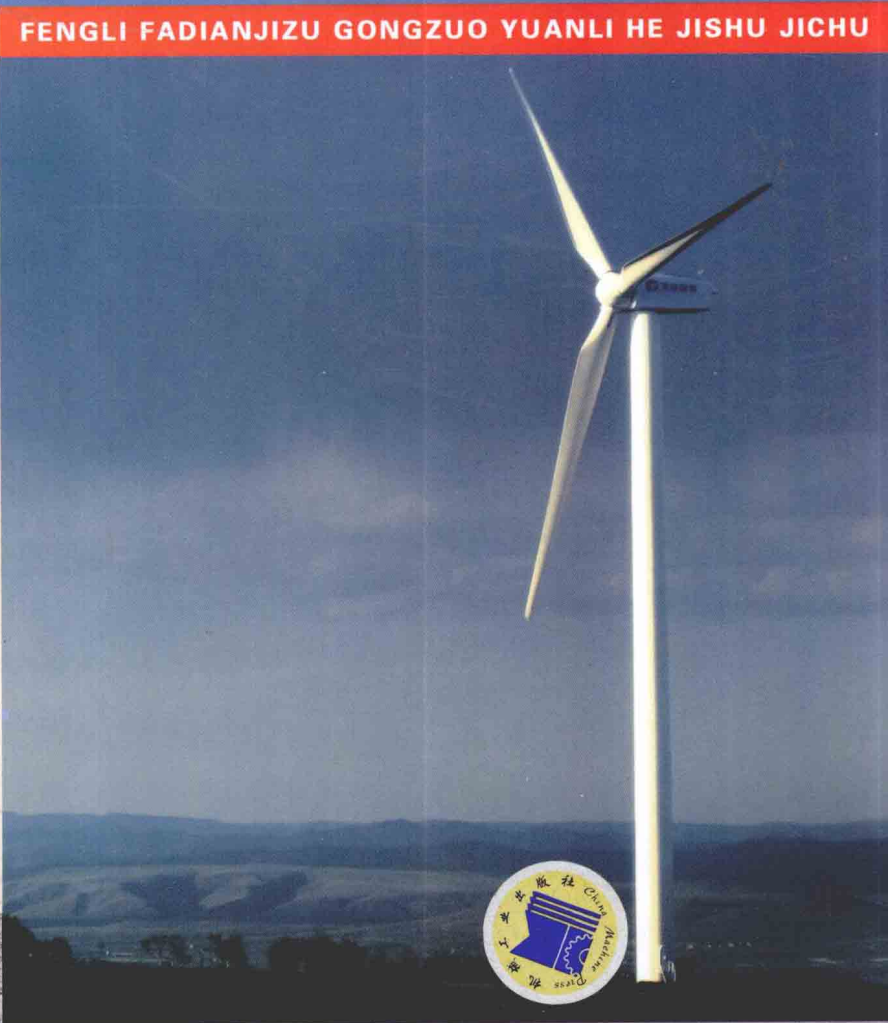
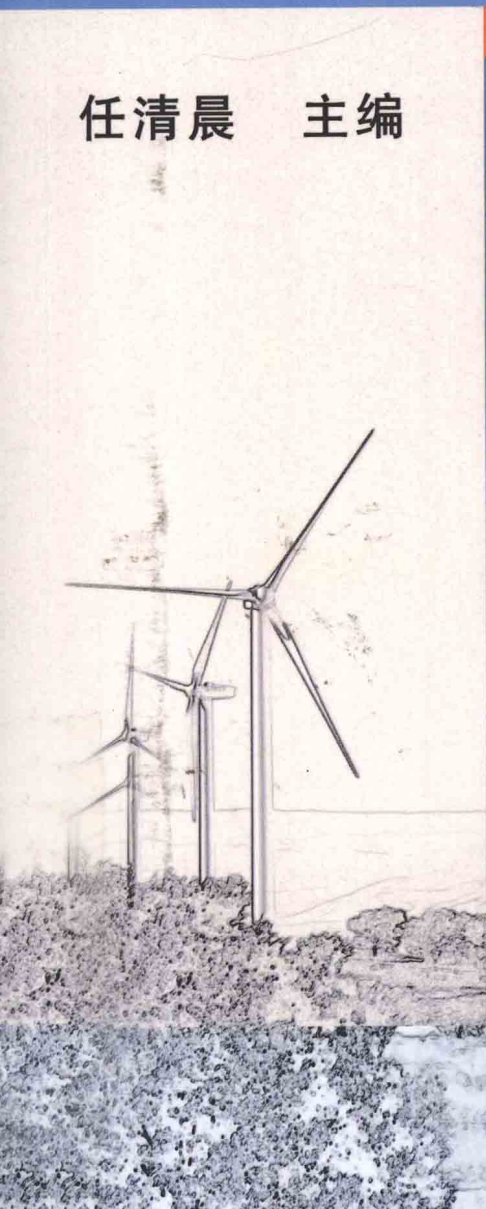
FENGLI
FADIAN JIAOXUE
YU PEIXUN YONGSHU

风力发电教学与培训用书

风力发电机组 工作原理和技术基础

FENGLI FADIANJIZU GONGZUO YUANLI HE JISHU JICHU

任清晨 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

风力发电教学与培训用书

风力发电机组

工作原理和技术基础

主 编 任清晨
参 编 满翔宇 解春艳 李 刚



机械工业出版社

本书采用图文并茂的形式,详细介绍了风力发电机组的整机及其主要组成部分的结构、工作原理和技术要求。主要内容包括:风力发电机组概述、叶片、风轮轮毂与变桨距系统、风轮轴与齿轮箱、发电机、制动系统、液压系统、支撑系统、控制系统。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组工作原理和技术基础/任清晨主编. —北京:机械工业出版社, 2010. 2

风力发电教学与培训用书

ISBN 978 - 7 - 111 - 29477 - 1

I. 风… II. 任… III. 风力发电机 - 机组 - 技术培训 - 教材 IV. TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第002292号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:徐彤 马晋 责任编辑:王振国

版式设计:霍永明 封面设计:路恩中

责任校对:姚培新 责任印制:乔宇

北京京丰印刷厂印刷

2010年2月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·10.75印张·261千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978 - 7 - 111 - 29477 - 1

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

风能是一种取之不尽、用之不竭的绿色环保型可再生能源。在可再生能源中，利用风能发电是除水能资源外技术最成熟、最具有大规模开发和商业利用价值的发电方式。由于其在减轻环境污染、减少温室气体排放、促进可持续发展方面的突出作用，越来越多地受到世界各国的高度重视。

我国已把利用风能作为一项基本的能源政策。第十一个五年计划以来，我国的风力发电产业发展迅猛，风力发电人才的缺口很大，许多大学与职业技术学院相继开设新能源或风力发电专业，但苦于没有合适的教材。作者根据近年来讲授风力发电设备的心得体会，参照国家和行业制定的相关标准，结合带领学生下厂实习所获得的知识和本专业教学经验，编写出适合大学及职业技术学院学生学习能力的，适合工作在风力发电设备生产第一线人员培训需要的，介绍风力发电机组生产技术的教学与培训用书，也可以作为自学资料。

本丛书由三个分册组成，即《风力发电机组工作原理和技术基础》、《风力发电机组生产及加工工艺》、《风力发电机组安装·运行·维护》，构成一个比较完整的教材体系。特点是以国家及行业标准为主线，避开与生产无关的纯理论问题，重点介绍风力发电机组的实用生产技术。学习本丛书前，最好先学习一些机械、电工电子和液压基础知识，这样会收到事半功倍的学习效果。

鉴于在市场经济环境下，各生产企业间存在着激烈的竞争，各生产企业均将新设计、新材料、新工艺作为商业秘密对待。因此本书有关新设计、新材料、新工艺方面的内容不可能详尽，可能无法满足一些读者需求，在此敬请理解和原谅。一个产品的加工工艺方法往往不是唯一的，没有最好只有更好，希望能对读者起到抛砖引玉的作用。

本丛书在编写过程中查阅了大量的相关国家标准和出版物，并且阅读了互联网上的相关文章，这些资料为本丛书的编写提供了大量的素材。本丛书中的部分图片由吴昊老师绘制，在此向这些出版物和文章的作者及吴昊老师表示衷心的感谢。本丛书内容经过中国科学院电工所科诺伟业公司武鑫博士、中科宇能公司技术总监徐宇博士后、天威保变风电公司鲁志平总工程师、国电联合动力技术公司王志强总工程师、中航惠腾风电公司王志军工程师审阅，在此向参加审阅的专家、学者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中错误和不当之处在所难免，诚请广大读者朋友批评指正。

编 者

目 录

前言		
第一章 风力发电机组概述	1	
第一节 风能的利用	1	
第二节 风力发电机组	5	
第三节 风力发电机组的要求	9	
本章小结	15	
复习思考题	16	
第二章 叶片	17	
第一节 叶片的技术和经济要求	17	
第二节 叶片的典型结构	18	
本章小结	27	
复习思考题	27	
第三章 风轮轮毂与变桨距系统	28	
第一节 风轮轮毂	28	
第二节 变桨距系统	30	
本章小结	41	
复习思考题	43	
第四章 风轮轴与齿轮箱	44	
第一节 风轮轴与齿轮箱的技术要求 及典型结构	44	
第二节 齿轮箱的主要零部件	51	
第三节 齿轮箱的润滑与监控	55	
本章小结	58	
复习思考题	59	
第五章 发电机	61	
第一节 发电机概述	61	
第二节 风力发电用发电机	66	
本章小结	75	
复习思考题	76	
第六章 制动系统	77	
第一节 制动系统概述	77	
第二节 机械制动器的结构	81	
第三节 制动系统的控制要求	85	
本章小结	86	
复习思考题	87	
第七章 液压系统	88	
第一节 液压系统概述	88	
第二节 风力发电机组液压系统的类型	91	
第三节 风力发电机组对液压系统 及零部件的要求	96	
本章小结	103	
复习思考题	105	
第八章 支撑系统	106	
第一节 机舱与底盘	106	
第二节 偏航系统	109	
第三节 塔架	117	
本章小结	120	
复习思考题	121	
第九章 控制系统	123	
第一节 控制系统概述	123	
第二节 控制功能和参数	130	
第三节 安全保护系统	138	
第四节 监控和安全处理	143	
第五节 远程监控系统	150	
第六节 变流器	155	
本章小结	161	
复习思考题	163	
参考文献	165	

第一章 风力发电机组概述

学习有关风力发电方面的知识应该系统地进行，才能收到事半功倍的效果。我们从介绍风能利用的常识开始，逐步引入到风力发电机组的结构组成和工作原理，并进一步介绍风力发电机组的技术要求。通过本章的学习，我们应该能够了解风能的特点，熟悉风能的主要指标，了解我国风能分布的特点，掌握风能利用系数 C_p 、叶尖速比 λ 的定义，熟悉风力发电机组的工作原理及运行方式，掌握风力发电机组的结构组成和对风力发电机组的技术要求。

第一节 风能的利用

从人类知道利用火以来，植物的茎叶就被作为燃料利用已有几千年的历史了，但这已远远不能满足人类的需求。随着科学技术的不断发展，煤、石油和天然气已成为当今世界的主要能源。煤、石油和天然气这类天然性矿物资源是经历几十亿年的时间形成的，随着人类的大量采掘其储藏量将日渐枯竭，由于这些燃料资源的稀缺性和不可再生性，使其价格不断攀升。由于人类对石油类燃料的过度依赖，一些国家为保障自己的能源安全，甚至不惜采用战争手段进行掠夺。而这些战争又进一步加剧了世界性的能源危机，促使能源价格不断暴涨。

另一方面，随着世界经济的发展，人类对能源的消耗也日益增加。燃料性能源的大量使用，导致了有毒、有害气体的大量排放，严重地危害着人类的身心健康；同时也导致了地球表面温度的不断升高，其结果是冰川融化、海平面升高、气候异常，这终将会给人类的生存带来难以预料的灾难。因此寻找新的、清洁的、无污染的、可再生的替代性能源是当今人类世界面临的重要课题。

在小学自然课上就曾讲过：风是空气流动的现象。热空气上升，冷空气下降，空气一旦流动起来就形成了风。空气有一定的质量，因此空气的流动就具有一定的动能，这就是人类可以利用的风能。动能的物理学表达式为 $E = 1/2mv^2$ ，所以由空气密度决定的空气质量和风速是决定风能大小的重要指标。

风能是太阳能转化而来的，地球表面吸收太阳能的不均匀性造成地球表面具有一定的温度差，即温差，这种温差引起空气流动。所以风能是清洁的、无污染的、取之不尽用之不竭的可再生能源。在常规能源价格日益攀升以及全人类对生态环境保护意识的提高的双重压力下，风能将逐渐成为 21 世纪人类利用的主要能源。

一、风能的特点

了解风能的特点，对于我们科学地利用风能具有十分重要的意义。

风能的首要特点是变化性和不稳定性。由于气候、时间及地理环境的影响，在每一个时间点和空间点上风力的大小、风的方向都在瞬时变化着。风能的这种不稳定性，使我们在对风能利用时将会有很多问题需要解决。

风能的第二个特点是：风力的大小从地球表面起，随海拔的升高而增大。其根本原因

是，随着海拔的升高地球表面与流动空气摩擦阻力的影响越来越小。这就是为什么风力发电设备都安装在相对地势比较高的地方的原因。

风能的第三个特点是：空气的密度随海拔的升高而逐渐减小。所以虽然海拔高处风较大，但是由于空气质量小，风能量并不大。这就是为什么在青藏高原上虽然风很大，风能利用效率却不高的原因。

二、衡量风能的主要指标

1. 风的等级

风的等级是人们为了对风这种自然现象进行研究，而人为地将风速由低到高划分的等级。目前全世界通用“蒲福氏风级表”。风压是指一定风速吹在与风速相垂直的平面上的单位面积上的压力。风的等级与风压的对应关系见表 1-1。

表 1-1 风的等级与风压的对应关系

风力等级	风 速			风力名称	风压 /($\times 10\text{N}/\text{m}^2$)	可在陆地上观察到的现象
	km/h	m/s	mile/h			
0	<1.0	0~0.2	<1.0	—	—	无风平静,炊烟直上,树梢不动
1	1~5	0.3~1.5	1~3	软风	0.13(1m/s)	炊烟飘动,风向标不转动,脸上无风感
2	6~11	1.6~3.3	4~7	轻风	0.8(2.5m/s)	炊烟倾斜,树叶颤动,脸上有风感
3	12~19	3.4~5.4	8~12	微风	3.2(5m/s)	树叶及小树枝轻轻摇动,旗帜轻轻飘起
4	20~28	5.5~7.9	13~18	和风	6.4(7m/s)	细树枝轻轻摇动,草被吹成浪状,细土面能吹起
5	29~38	8~10.7	19~24	清劲风	13(10m/s)	小树枝开始摇动,旗帜全部展开飘动并哗哗响
6	39~49	10.8~13.8	26~31	强风	22(13m/s)	大树枝摇动,电线发出啸叫声,用伞困难
7	50~61	13.8~17.1	32~38	疾风	33(16m/s)	全树摇动,迎风行走很吃力,尘土吹到天空中
8	62~74	17.2~20.7	39~46	大风	52(20m/s)	小树枝被吹断,迎风行走困难,沙土吹到天空中
9	75~88	20.8~24.4	47~54	烈风	69(23m/s)	大树干折断,轻结构受损,轻屋顶被吹走
10	89~102	4.5~28.4	55~63	狂风	95(27m/s)	树连根拔起,房屋受到严重损坏,电线被吹断
11	103~117	28.5~32.6	64~72	暴风	117(30m/s)	建筑物遭重大破坏,大树连根拔起
12	118~133	32.7~36.9	73~82	飓风	160(35m/s)	陆地少见,通常发生在海洋
13	134~149	37~41.4	83~92	飓风	208(40m/s)	—
14	150~166	41.5~46.1	93~102	飓风	265(45m/s)	—
15	167~183	46.2~50.9	103~114	飓风	325(50m/s)	—
16	184~201	51.0~56.0	115~125	飓风	365(54m/s)	—
17	202~220	56.1~61.2	126~136	飓风	470(60m/s)	—

2. 年平均风速

风能瞬时的变化性和不稳定性使我们在利用风能时遇到困难，需要我们在设计和制造风力发电机时予以解决。但从一个风力发电场的区域来讲，从某一年的一个时间段来讲，风力的变化还是有规律可循的，我们将年平均风速作为评价一个风场开发价值的重要指标。年平均风速由当地气象台站的历年观测统计数据给出。风力发电机轮毂中心高度处的最小年平均

风速，是判定一个风电场开发是否经济的标准。以目前矿物性能源价格和上网电价为参照物，只有当年平均风速大于 5m/s 时，风能的开发利用才有经济价值。

3. 有效风速

有效风速一般也称为可利用风速。因为在当前的技术条件下，只有当风速大于 3m/s 时才能有效地推动风力发电机叶轮，使其进入正常的工作状态。风力发电机一年的正常工作小时数决定了风力发电机的工作效率及经济性。年平均风速大于 3m/s 的年小时数，表明风场在一年内风力发电机可以起动工作的小时数。小时数越多说明风场利用价值越高。

4. 参考风速和极限风速

参考风速定义为50年一遇的、在轮毂高度处能持续10min的阵风平均风速。极限风速定义为1.4倍参考风速。极限风速这一指标的意义在于它决定了风力发电机设计时的强度和刚度指标。风力发电机要想安全地工作，风力发电机组及其零部件就必须保证在瞬时最大风速时不会损坏。

三、我国风能分布的特点

我国在地球的北半球，地处太平洋西岸，特定的地理位置和我国特有的地形地貌，使我国风能资源分布有以下特点：

- 1) 东南沿海及其岛屿是我国的最大风能资源区。但是这一区域仅限于沿海岸线几十公里的陆地，向内陆由于丘陵的阻滞会使风能锐减。
- 2) 新疆的东部、甘肃的北部和内蒙古中西部也是我国的风能资源密集区。这一地区地势平坦广阔，虽然风力由北向南逐渐减弱，但变化较慢，也是我国风能资源比较丰富的地区。
- 3) 黑龙江和吉林两省的东部及辽东半岛沿海地区风能资源也很丰富。
- 4) 青藏高原北部、新疆北部、华北北部、内蒙古东部、东北的西北部和渤海、黄海沿海地区也属于风能资源较丰富地区。

风力资源的好坏直接决定风电成本的高低，根据我国风能资源情况及技术经济条件，开发重点应放在内蒙古、东北、西北、西藏、东南沿海及岛屿、高山、风口等风能资源丰富地区，尤其是经济发达、电网条件好的地区。另一方面，我国海岸线较长，发展海上风电场也是我国风电发展的一个方向。

四、风力发电

除帆船是靠风帆直接推动来利用风能外，一般都是利用风轮收集风能，再将其转变成旋转机械能驱动各种工作机械。良好的风场多数又处于人烟稀少的地区且机械能不能进行远距离传送，而电能是一种清洁干净的二次能源，具有利用电网便于远距离输送的优势。于是通过发电机，将风轮收集转化成的机械能再转变成电能，成为风能利用的主导方式。

并网型风力发电机组的功能是将风的动能转换成机械能，再将机械能转换为电能，输送到电网中。一台风力发电机组为了实现转换功能由若干机构和零部件组成，目前市场上水平轴三叶片风力发电机组占主导地位。并网型风力发电机的结构比较复杂，为了便于和离网型风力发电机相区别，习惯上把并网型风力发电机称为风力发电机组，也简称为风电机组。

1. 风力发电常识

对于利用风轮收集风能，我们必须了解风轮输出功率与风速和转速的关系。在一定风速下如何提高风轮捕获风能的效率，必须研究风轮机构的特性。风轮机构的参数如下：

(1) 风能利用系数 C_p 风轮从自然风能中收集能量的大小程度用风能利用系数 C_p 表示，根据贝兹 (Betz) 理论可以推得风力涡轮机的理论最大利用系数为： $C_{pmax} = 0.593$ 。由于技术原因目前风轮的风能利用系数 C_p 一般在 0.4 ~ 0.5 之间，它是衡量叶片和风力发电机组设计的重要指标。

(2) 叶尖速比 λ 为了表示风轮在不同风速中的状态，用叶片的叶尖线速度与风速之比来衡量，称为叶尖速比 λ ，即 $\lambda = \text{叶尖线速度} / \text{风速}$ 。叶尖速比 λ 值越大，风轮效率越高。由于受到材料性能限制，实践表明当叶尖线速度超过 100m/s 时叶片将很快被破坏，而当叶尖线速度超过 70 ~ 80m/s 时叶片将产生严重的噪声，因此在风力发电机组的设计中叶尖线速度不超过 65m/s。

风轮的转速、输出功率还与叶片迎风角有关，在工作区段中，迎风角越大， λ 和 C_p 越小。在桨叶倾角固定为最小值的条件下，风轮随风速变化而改变转速。通过调速装置使输出功率与转速的关系变得在所有风速下都工作于最大工作点，此时发出的电能最多，否则发电效率会降低。

从风力发电机组的运行原理分析，要求风力发电机组的转速正比于风速变化，并保持一个恒定的最佳叶尖速比，从而使风力发电机组风轮的风能利用系数 C_p 保持最大值不变，风力发电机组输出最大的功率。

2. 风力发电产业

风力发电产业是一个产业链，它由上游、中游和下游三部分组成。

(1) 上游 上游又称为风电第一产业，是风力发电投资企业。风力发电投资企业是风力发电场的投资者和产权所有者，他们通过风力发电场的经营获得投资收益。同时负责风力发电机组的维修和风力发电场运营。而风力发电机的安装、维修企业负责风力发电机组的安装、调试和维修。

(2) 中游 中游又称为风电第二产业，包括风力发电机研发机构、风力发电机组制造厂和风力发电机零部件制造厂，负责为风力发电投资企业提供风力发电机组所需的装备。目前，风力发电机组制造厂和风力发电机零部件制造厂在我国正处于蓬勃发展的鼎盛时期。风力发电机组的零部件中，齿轮箱、制动器、液压装置、主轴、轮毂、塔架的制造在我国已比较成熟，没有必要建立新厂；而机组总装厂、叶片厂、机舱厂、控制器厂、变桨距和偏航轴承厂等风电专门企业也如雨后春笋般地建立起来。这些风电企业的发展壮大，急需大批具备风力发电设备知识和技能的人才，为其提供了广阔的就业前景。

(3) 下游 下游又称为风电第三产业，即风电服务业。它是为风电第一产业和第二产业提供技术、经济等各种服务的企事业单位、中介机构。风电服务业发展潜力很大，前景广阔。随着风电场建设规模的扩大，相关的技术咨询、技术服务，包括风电建设前期的项目开发商业服务，建设前的项目咨询、风资源调查、选址、规划、设计；建设过程中的监理、管理服务、安装及施工指导；建成后的运行管理、监测、检修等环节都有着十分巨大的服务需求，而目前能提供相应服务的机构与人员十分缺乏，这一产业蕴藏着巨大的市场机遇和就业前景。

第二节 风力发电机组

一、风力发电机组的组成部分

风力发电机组必须保证其在各种风况、气候和电网条件下能够长期安全运行，并取得最大的年发电量和最低的发电成本。但是风的速度和方向是不断变化的，风力发电机组各个零部件随时承受着交变载荷。因此，各零部件的疲劳强度是影响机组寿命的主要因素，风力发电机组对材料、结构、工艺和控制策略都提出了很高的要求。因此，风力发电机组的结构比较复杂，由风轮（叶片、轮毂）、风轮轴、调速装置、发电机、制动系统、液压系统、机舱、偏航系统、塔架、控制系统等部分组成。下面我们把这些部件功能逐一讲解。

（一）风轮

风轮由叶片和轮毂等部件组成，是获取风能并将其转换成机械能的关键部件。叶片是具有空气动力学外形，在气流推动下产生力矩使风轮能绕其轴转动的主要构件。轮毂是能固定叶片位置，并能将叶片组件安装在风轮轴上的装置。

三叶片风轮的受力平衡好、轮毂简单、风轮的动态载荷小，由于稳定性好，在高叶尖速比运行时有较高的风能利用系数，在并网型风力发电机组上得到广泛应用。三叶片风轮能提供最佳的效率，使风力发电机组系统运行平稳，基本上消除了系统的周期载荷，可输出稳定的转矩。同时，三叶片风轮可以产生令人满意的审美效果。

风轮的扫掠面积和风速，决定了将风能转换成机械能的大小。风轮扫掠面积是指风轮叶片旋转运动时所做的圆，也就是在垂直于风速矢量平面上的投影面积。风轮应具有承受沙尘、盐雾侵袭的能力，并有防雷措施。

（二）风轮轴

简称为主轴。主轴起着固定风轮位置、支撑风轮重量、保证风轮旋转、将风轮的力矩传递给齿轮箱或发电机的重要作用，风轮安装在主轴上。

（三）调速装置

调速装置的作用有三个：一是当风轮转速低于发电机额定转速时，通过调速装置将转速提高到发电机额定转速。二是当风轮转速高于发电机额定转速时，使风轮轴转速保持在发电机额定转速，以保证风力发电机组安全、满负荷发电。发电机的超速运行会使输出电压过高，破坏发电机绝缘；过高的转速会使轴承烧毁。三是当风轮转速超过其额定最高转速时，使风力发电机组安全停机，保护风力发电机组不致损坏。

1. 定桨距叶片失速控制调速装置

失速是一种空气动力学现象，最早使用在飞机机翼的设计试验中，失速是当翼型升力系数随迎风角度的增加开始下降的异常现象。其机理在于气流与叶片分离，叶片将处于“失速”状态，叶片的转速会大幅度降低，使风轮输出功率降低。

2. 可变桨距调速装置

由于风力发电机叶片形状酷似划船用的船桨，所以习惯上把风机叶片称为桨叶。可变桨距调速就是通过改变叶片迎风角度来调节风轮转速的装置。目前兆瓦以上的风力发电机普遍采用可变桨距调速装置。其工作原理是：通过检测装置检测出风速后，由驱动装置驱动叶片

改变迎风角度，从而保证风轮转速稳定在额定转速。叶片迎风角的调节规律是：增大迎风角可以减少由于风速增大而使叶片转速加快的趋势。

变桨距风轮的叶片与轮毂通过变桨距轴承连接。虽然其结构比较复杂，但能够获得较好的性能，而且叶片承受的载荷较小，重量轻。叶片的变桨距驱动有电动机驱动方式、液压驱动方式、机械驱动方式多种，具体结构我们将在后面章节中详细介绍。

3. 齿轮箱调速装置

齿轮箱的作用是将风轮旋转速度在高速轴侧提高到一个满足发电机需要的转速。由于材料强度的限制，当叶片叶尖的线速度超过 100m/s 时叶片将损坏，所以风力发电机组的风轮转速一般在每分钟几十转。而发电机的转子同步转速为 $n = 60f/p$ ，常用发电机的转子同步转速为 750r/min 、 1000r/min 或 1500r/min 。

齿轮箱是大中型风力发电机的重要组件，它的输入端是低速轴，通过连轴器连接风轮轴；输出端为高速轴，通过连轴器连接发电机。齿轮箱应有油位指示器和油温传感器，寒冷地区应有加热油的装置。

（四）制动系统

制动系统的作用是，在遇到超过风力发电机设计风速的大风时，或风力发电机的零部件出现故障时，其可以使风力发电机组安全停机。因此，制动系统可以保障风力发电机组的安全，避免故障的扩大和更多零部件损坏，以及造成人员的伤亡。

大型风力发电机组的重量大、运动部件惯性大，因此大型风力发电机的制动系统比较复杂。为了保证安全性，根据国家标准要求，风力发电机组至少应具有两种不同原理的能独立有效制动的制动系统。大型风力发电机组的制动系统往往包括：空气动力制动系统、机械制动系统、液压制动系统、电气制动系统等若干子系统。

（五）发电机

发电机的功能是将风轮收集的机械能转变成电能。传统的发电机都是按输入稳定的转矩和转速设计的，因而无法适应风轮输出的瞬时变化的转矩和转速，所以风力发电机组应该使用为风力发电而设计制造的专用发电机。风力发电机组的发电机防护等级应能满足防烟雾，防沙尘暴的要求。湿度较大的地区应设有加热装置以防结露。发电机应装有定子线圈测温装置和转子测速装置。风力发电机组常用的发电机有异步交流发电机、异步双馈型交流发电机、永磁同步发电机。

（六）机舱

机舱由底盘和机舱罩组成，底盘上安装除了塔架以外的主要部件。机舱罩后部的上方装有风速和风向传感器，舱壁上有隔音和通风装置等，底部与塔架连接。

1. 底盘

底盘的功能是固定风轮轴、齿轮箱、发电机、机舱、偏航驱动装置及相关零部件，并承载其重量。

2. 机舱罩

机舱罩的作用是保护底盘及底盘上所安装零部件，使其免受风、霜、雨雪、冰雹、沙石、粉尘及腐蚀性气体的侵害，延长其使用寿命，使风力发电机组更加美观漂亮。机舱罩和底盘就像一间房屋，零部件生活在其中。机舱内部应有消声设施，并具有良好的通风条件；机舱内部照明设备齐全，亮度满足工作要求；机舱应满足防盐雾腐蚀、防沙尘暴的要求；机

舱应有防止小动物进入的措施。

(七) 偏航系统

风力发电机组的对风简称为偏航，对风装置又称为偏航系统。对风机构是针对风向瞬时变化的不稳定性，为保证风力发电机组的最大输出功率所专门设计的装置。其作用是使风轮的扫掠面始终保持与风向垂直，以保证风轮每一瞬间捕获到最大风能。

风力发电机组的偏航运动部件重量大、运动惯性大，因此风力发电机组偏航驱动一般采用伺服系统。伺服系统比较复杂，由风向检测装置、导向装置、偏航驱动机构和控制系统等部分组成。具有反馈比较环节的闭环控制系统，具有反应快、跟踪能力强、工作稳定可靠的特点。偏航系统应设有自动解缆和扭缆保护装置；在寒冷地区，测风装置必须有防冰冻措施。

(八) 液压系统

液压系统由电动机、液压泵、油箱、过滤器、管路及各种液压阀等组成，主要是为变桨距液压缸和机械制动器提供必要的驱动液压力，有的强制润滑型齿轮箱也需要液压系统供油。液压缸主要是用于驱动定桨距风轮的叶尖制动装置或变桨距风轮的变距机构。

(九) 塔架

塔架的作用是：用其支撑风轮和整个机舱的重量，并使风轮和机舱保持在合理的高度，使风轮旋转部分与地面保持在合理的安全距离。

塔架支撑机舱达到所需要的高度，其上安置发电机和控制器之间的动力电缆、控制和通信电缆，还装有供操作人员上下机舱的扶梯，大型机组还设有电梯。对于塔架的攀登设施，其中间应设休息平台，还要有可靠的防止坠落的保护措施，以保证人身安全。塔架内部照明设备应齐全，亮度满足工作要求。塔架应满足防盐雾腐蚀、防沙尘暴的要求，筒式塔架均应有防止小动物进入的措施。

(十) 控制系统

控制系统的功能是对整机进行运行状态控制，即风力发电机从一种运行状态到另一种运行状态的转换过渡过程的控制。

风力发电机组部件多、体积大、价格高且相互关联紧密，维护维修难度大，存在并网问题，所以对可靠性、安全性的要求很高。大型风力发电机的控制系统是一个很复杂的微型计算机控制系统，包含若干个子系统，安装在控制箱、控制柜内。控制箱、控制柜也应有防止小动物进入的措施。

二、风力发电机组的铭牌数据

风力发电机组的铭牌数据以最简单明了的方式，向用户介绍了风力发电机组从选型、订货到运行、维护和检修所必需的数据。熟悉风力发电机组铭牌数据对每个风电从业者来说都很重要。根据《风力发电机组 安全要求》(GB18451.1—2001)，产品铭牌上必须突出明显地标示下列内容：

- 1) 风力发电机组的制造厂和国家。
- 2) 型式和产品编号。
- 3) 产品生产日期。
- 4) 参考风速(即额定风速)。

- 5) 轮毂高度工作风速范围, 切入风速和切出风速。
- 6) 工作环境的允许温度范围。
- 7) 风力发电机组的等级。
- 8) 风力发电机组输出端额定电压。
- 9) 风力发电机组输出端频率或频率范围, 频率允许变化范围应在额定频率 $\pm 2\%$ 以内。

风力发电机组产品铭牌为我们在产品选型、配套设施建设、维修备品备件准备提供了依据。风力发电机组的等级是安全等级, 根据 IEC61444-1 定义。

三、风力发电机组的随机技术文件

风力发电机组的随机技术文件是指导用户正确安装、使用、维护风力发电机组的纲领性文件, 其内容包括: 随机技术文件清单、产品合格证、产品说明书(包括使用、原理、维护等)、机组装配图(包括安装图)、电气接线图、交货明细表、出厂试验记录。

四、风力发电机组的运行方式

(一) 恒频恒速运行方式

在风力发电机组向恒频电网送电时, 电网频率将强迫控制风轮的转速, 发电机组在不同风速下维持或近似维持同一转速, 这就是风电机组的恒频恒速运行方式。

定桨距失速恒频恒速异步发电机组在无法生产高电压大功率电子变流器件的一段时间内曾是主流机型。我国在 2000 年前进口的风力发电机组及引进技术生产的风力发电机组都是这种机型, 因此这种机型目前在我国仍有一定的保有量, 有必要进行讲解。

定桨距是指桨叶与轮毂的连接是固定的, 即当风速变化时, 桨叶的迎风角度固定不变。失速是指桨叶本身所具有的失速特性, 当风速高于额定风速时, 气流将在桨叶的表面产生涡流, 使效率降低, 产生失速, 来限制发电机的功率输出。由于风速变化引起的输出功率的变化只通过桨叶的被动失速调节, 而控制系统不作任何控制, 使控制系统大为简化。但是在输入变化的情况下, 风力发电机组只有很少的机会能够运行在最佳状态下, 因此机组的整体效率较低, 兆瓦级以上的大型风力发电机组已淘汰此种机型。

为了提高风力发电机组在低风速时的效率, 通常采用双速发电机(即大/小发电机)。在低风速段采用小型发电机运行, 高风速段采用大型发电机运行, 使桨叶具有较高的气动效率, 提高了发电机的整体运行效率。定桨距恒频恒速异步发电机组只能在低于最佳效率的状态下运行, 但其结构简单, 工作可靠, 并网时必须进行无功补偿。

(二) 变速恒频运行方式

如果风轮转速可以连续进行调节, 则叶尖速比可以保持在最大常值 C_{pmax} , 风力发电机组的效率将显著增加。在调节转速的过程中, 需要主动进行桨距角的控制来保持叶尖速比恒定, 桨距角需要总是控制在最佳位置。在额定风速以上的运行状态, 要保持转速恒定也需要进行变桨距控制调节。

只要在发电机和电网之间加入变流器, 发电机转速就可以与电网频率解耦, 并允许风轮速度有变化, 也能控制发电机的气隙转距。变速运行有一些优点:

- 1) 在额定的风速以下, 风轮速度可以随风速变化以保持最大空气动力学效率。
- 2) 低风速下风轮速度的降低减小了气动噪声, 因为此时风的噪声无法掩盖风力发电机

组的噪声。

3) 风轮可以作为飞轮,在传动链之前去除空气动力学转矩波动。

4) 对气隙转矩的直接控制实际上控制了风轮转速及发电机输出功率。

5) 有功功率和无功功率都可以控制,这样可以提高功率因数,可以作为无功功率源来补偿电网中其他用户不良的功率因数,降低电网的电力波动。

变速恒频的优点是大范围内调节运行转速,来适应因风速变化而引起的风力发电机组功率的变化,可以最大限度地吸收风能,因而效率较高。同时,在控制方式上也很灵活,可以较好地调节系统的有功功率、无功功率,但控制系统较为复杂。变速恒频这种调节方式是目前公认的最优调节方式,是风电技术的主要发展方向。当前生产的兆瓦级以上风力发电机组都是采用变速恒频运行,代表机型是变桨距变速恒频双馈机组和变桨距变速恒频永磁直驱机组。

在满足电网频率要求的条件下,通过连接在发电机与电网间的变流器,可以很方便地控制发电机的气隙转矩;通过控制气隙转矩可以很方便地使发电机的转差率在 $\pm 10\%$ 的范围内调节,可以使双馈机组的转速在 $\pm 30\%$ 同步转速范围内连续可调,使永磁直驱机组的转速在 $\pm 50\%$ 同步转速范围内连续可调,满足了机组调速范围宽的要求。双馈机组电网通过变流器连接转子的称为“窄带”变速,双馈机组属于“窄带”变速;电网通过变流器连接定子的称为“宽带”变速,永磁直驱机组属于“宽带”变速。

第三节 风力发电机组的要求

风力发电机组是将风能转换成机械能,再将机械能换成电能的工业设备。它的机构、性能不同于传统的发电设备,是一种专门针对风能的特点,根据用户要求设计出来的专用发电设备。本书所讲的风力发电机组特指大型并网型风力发电机组,其发出的电能通过并网输入原有的电力网中。

用户对风力发电机组的要求,是企业设计、选用材料、生产制造和检测验收风力发电机组的重要依据。只有满足了用户对风力发电机组的要求,风力发电机组生产企业才能有市场,才能有自我生存的空间。满足用户的需求是每一个风力发电机组生产企业义不容辞的责任。根据用户对风力发电机组的要求,国家制定出一系列有关风力发电机组设计、生产和使用的国家及行业标准,用以规范风力发电机组设计、生产和使用。对风力发电机组的要求主要有以下几个方面:

一、经济性

用户对风力发电机组经济性的要求很简单,就是在保证可靠性、安全性和环境保护要求的前提下,风力发电机组的销售价格越低越好。风力发电机组的价格低,风电场的投资就可以减少,使发电成本降低,才能使风力发电在发电市场上有竞争力,才能获得投资收益。而风力发电机组的使用寿命长,可使每年的折旧费用降低,也可使发电成本降低。如果超过折旧年限的风力发电机组仍能正常发电,则风力发电机组可以在近乎零成本下工作。

为了保证风力发电机组的经济性,国家标准对风力发电机组的性能要求如下:

1) 机组的切入风速应大于 2.5m/s ,小于 5.5m/s ;切出风速应大于 20m/s ,小于 30m/s 。

- 2) 机组的额定风速应满足《风力发电机组 设计要求》(JB/T 10300—2001) 的规定。
- 3) 机组的最大风能利用系数 C_{pmax} 应大于 0.44。
- 4) 机组在额定工况时, 其输出的功率应大于或等于额定功率。
- 5) 为保证风力发电机组的可靠运行, 风力发电机组及各零部件的使用寿命不低于 20 年。机组年可利用率应大于或等于 97%。

降低风力发电机组价格的关键是降低风力发电机组各零部件的价格。MW 级风力发电机组各零部件占整机成本的比例见表 1-2。

表 1-2 MW 级风力发电机各零部件占整机成本的比例

序 号	部件或项目名称	变桨距机型占成本比例(%)	定桨距机型占成本比例(%)
1	塔架	18.0	17.5
2	电网连接(箱变、电缆)	7.2	8.3
3	机舱	3.0(复合材料)	10.8(金属)
4	发电机	6.0	7.5
5	叶片	22.5	18.3
6	增速箱(齿轮箱)	15.3	12.5
7	主轴	3.4	4.2
8	轮毂	6.0(含变桨距机构)	2.5
9	偏航系统	1.3	4.2
10	中央监控系统	3.5	—
11	电控系统	3.5	4.5
12	液压制动系统	2.2	1.7
13	总装变频器	3.0	—
14	备品备件舱内电缆	1.0	—
15	运输、地基、安装	4.1	8.3

加快零部件成本降低的途径有两个: 一是靠国产化, 二是靠竞争。由于国家产业政策向风电的倾斜, 以及目前我国的风力发电机组零部件价格是参考进口零部件价格制定的, 所以目前风力发电机组零部件企业利润丰厚, 使一些有实力的企业进入风电零部件产业。它们或新建厂或利用自己原有的技术、设备优势转产、兼产, 企业的增多既使国产化进程加快, 又使竞争日趋激烈。从 2007 年到 2008 年仅一年时间, 国产化了的零部件价格通过招投标已下降了 40% 左右。但是一些关键技术和专用设备我们仍未掌握, 还需要进口。一些我们自己研发的风电零部件还没有经过时间的考验, 一些总装厂怕不可靠仍依赖进口, 使这些风电零部件价格仍居高不下, 随着时间的推移, 这些风电零部件价格也会降下来。

标准化也是降低风电零部件价格的一个重要途径。我国已加入国际标准化组织 (ISO), ISO 的电工委员会 (IEC) 制定出风力发电机组的若干标准。我国风力发电机组的国家标准就是采用的 IEC 标准。对于 IEC 尚未制定的有关风力发电机组的标准, 由中国机械工业联合会制定出机械行业标准。标准化使一些零部件的连接尺寸统一起来, 增加了互换性, 方便了

零部件的采购和维修。标准化也统一了一些零部件，使这些零部件便于大批量、大规模生产，将使这些零部件的制造成本大幅度降低。

二、可靠性

高可靠性是对风力发电机组的基本要求。只有风力发电机组运行稳定，不出或少出故障，才能多发电发好电，并减少维修费用。只有可靠性高，才能避免天天盼大风，大风来了又因故障无法发电的尴尬局面出现。

(一) 国家标准规定风力发电机组的限定条件

为了保证风力发电机组的可靠运行，国家标准制定了风力发电机组运行的限定条件如下：

1. 外部环境条件

- 1) 太阳辐射强度小于或等于 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 。
- 2) 机组正常运行的温度范围为 $-20 \sim +50^\circ\text{C}$ ，高寒地区为 $-25 \sim +45^\circ\text{C}$ 。
- 3) 机组运行的最高海拔为 4000m 。
- 4) 相对湿度应小于或等于 95% 。
- 5) 相当于未受化学污染的大气，北方地区应考虑大气中的沙尘条件。

2. 机组输出端电网条件

- (1) 电压范围 $(1 \pm 10\%)$ 额定电压。
- (2) 频率范围 $(1 \pm 2\%)$ 额定频率。
- (3) 电压对称性 即电压不平衡值应保持在电压负序分量与正序分量的比率不超过 2% 。
- (4) 停电次数与时间 每年电网停电应少于 20 次，每次最长停电持续时间应不超过 1 周。

3. 操作使用条件

机组的正确操作使用是指符合《产品使用说明书》或《用户手册》规定的操作方法、注意事项及维护保养要求为前提，并排除一切意外损害不可抗拒的自然灾害因素。

(二) 国家标准规定风力发电机组的可靠性指标

(1) 首次无故障运行时间 在限定的条件下，机组各部件的首次无故障运行时间 (MTTFF)，指可修复产品从开始使用到发生故障 (失效) 之前的平均工作时间。首次无故障运行时间自然是越长越好。其具体要求见表 1-3。

表 1-3 风力发电机组各部件首次无故障运行时间的具体要求

序 号	名 称	可靠度 (%)	MTTFF/h
1	风轮	90	2000
2	传动系统	95	3000
3	发电机	95	3000
4	限(调)速系统	90	2000
5	回转体	98	3000
6	调向系统	98	3000
7	支撑系统	95	3000
8	控制-逆变器	90	1500
9	机组	85	1500

(2) 平均故障间隔时间 在限定的条件下, 机组各部件的平均故障间隔时间 (MTBF), 指可修复产品在相邻故障之间的平均工作时间。机组各部件平均故障间隔时间也是越长越好。其具体要求见表 1-4。

表 1-4 风力发电机组各部件平均故障间隔时间的具体要求

序号	名称	可靠度 (%)	MTBF/h
1	风轮	90	3000
2	传动系统	95	3500
3	发电机	95	4000
4	限(调)速系统	90	3000
5	回转体	98	5000
6	调向系统	98	5000
7	支撑系统	95	5000
8	控制-逆变器	90	2000
9	机组	85	1500

(三) 风力发电机组的可靠性依赖质量保证体系

国家标准规定了风力发电机组的产品质量保证期。用户应按照使用维护说明书的规定, 正确使用和维护机组。制造商应保证机组在首次运行的 24 个月内, 或制造商自交货之日起不超过 30 个月内能良好地运行。如果在规定时间内因制造质量不良而发生损坏或不能正常工作的, 制造商应无偿地为用户修理或更换零部件。

要想保证可靠性, 质量控制是关键。因此, 国家标准要求风力发电机总装厂和零部件制造厂都必须通过 ISO 9001: 1994 (GB/T 19001—1994) 质量体系, 即设计、开发、生产、安装和服务的质量保证模式的认证。最低要求是通过 ISO 9002: 1994 (GB/T 19002—1994) 质量体系, 即生产、安装和服务的质量保证模式的认证。生产厂商必须保证质量保证体系的有效性。注意稳定质量, 提高机组的可靠性, 加强售前、售中、售后服务, 确保机组的可利用率等指标, 以取得风电场建设业主的认可, 才能逐步扩大销路、占领市场。

三、安全性

风力发电机组的安全性涉及风力发电机本身安全、运行维修人员安全及第三者安全, 事关重大不可掉以轻心。GB18451.1—2002 (IEC 61400—1: 1999) 规定了对风力发电机组的安全要求, 它涉及安全原理、质量保证、工程完整性和特定的要求, 包括设计、安装、维修和特定外界条件下的运行, 其目的是制定一个恰当的保护等级, 以防止机组在计划寿命周期内发生意外事件和损坏。风力发电机安全保护等级标准见表 1-5, 它定义了 4 个不同的等级为一般安全等级, 以适应不同地区的风力情况, 等级越高其对应的风速越低。另外, S 类为特殊安全等级, 其特殊要求和安全系数必须由制造厂与用户协商决定。该标准还涉及机组的各辅助系统, 例如保护机构、内部电气系统、机械系统、支撑系统、电气与负载的连接。