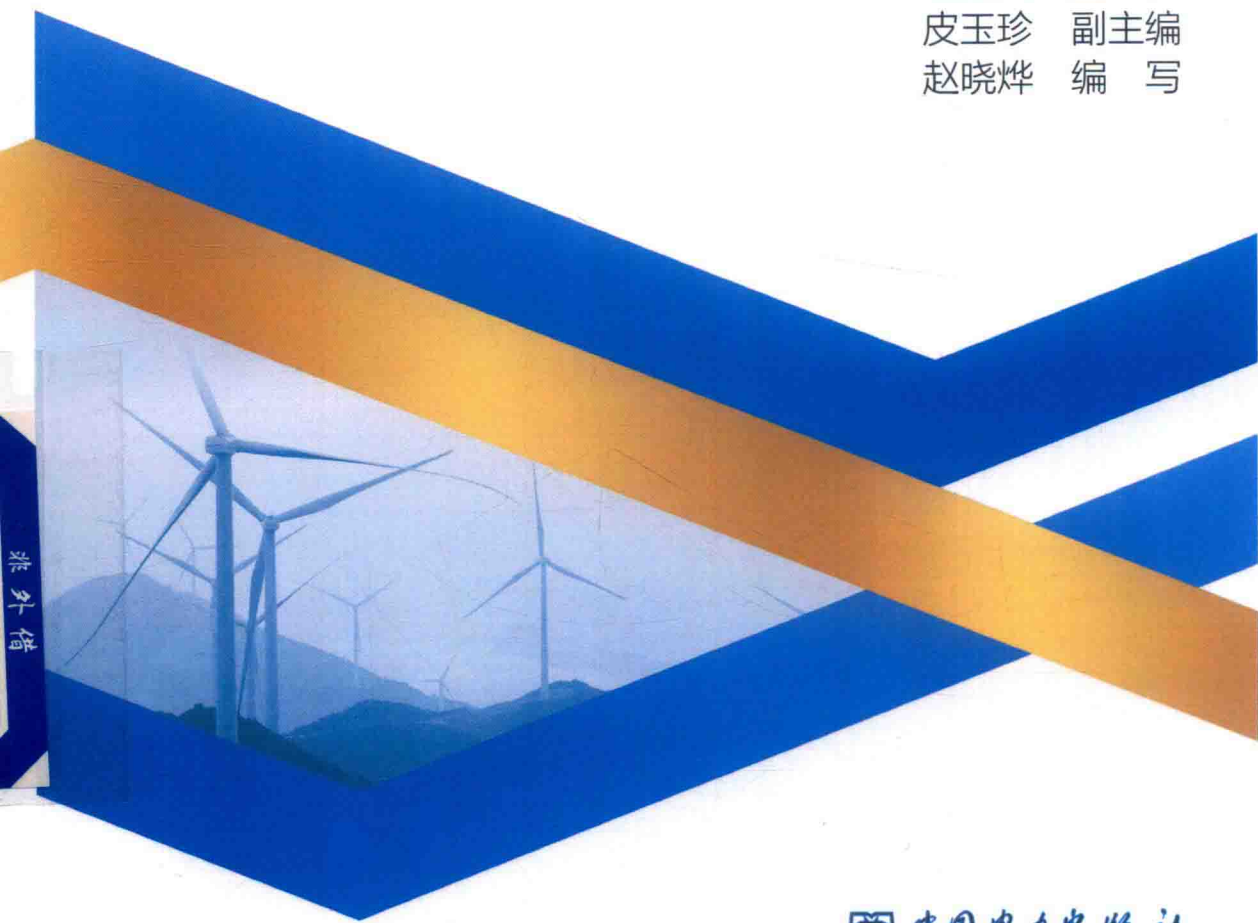




“十三五”普通高等教育规划教材

风力发电机组 结构及原理

赵万清 主 编
皮玉珍 副主编
赵晓烨 编 写



非
外
借



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育规划教材

风力发电机组 结构及原理

赵万清 主 编
皮玉珍 副主编
赵晓焯 编 写
孟祥萍 主 审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为风力发电技术系列教材。本书主要介绍了大型风力发电机组的结构及其原理的基本知识。全书共分9章,包括概述,风轮的结构及原理,风力发电机组的主传动和制动系统,风力发电机组偏航、变桨距和液压系统,风力发电机组的控制系统,风力发电机组的发电系统,风力发电机组的辅助系统,风力发电系统的并网,风力发电机组的保护系统。

本书可作为普通高等院校、高职高专院校相关专业的教学和参考资料,也可作为从事风力发电机设计、制造与使用人员自学和培训教材,也可作为风电爱好者的自学读物。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组结构及原理 / 赵万清主编. —北京: 中国电力出版社, 2019. 1

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5198-2225-5

I. ①风… II. ①赵… III. ①风力发电机—发电机组—高等学校—教材 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第155539号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 乔 莉(010-58382535) 柳 璐

责任校对: 王小鹏

装帧设计: 王红柳

责任印制: 钱兴根

印 刷: 北京建宏印刷有限公司

版 次: 2019年1月第一版

印 次: 2019年1月北京第一次印刷

开 本: 787毫米×1092毫米 16开本

印 张: 10.5

字 数: 258千字

定 价: 38.00元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前 言

随着现代工业的飞速发展，人类对能源的需求也越来越大，而常规能源日趋匮乏，因此，开发利用新能源以实现能源的持续发展，从而保证经济的可持续发展和社会的不断进步，最终实现人、资源、环境的协调发展倍受各国政府重视。而风力发电，以其无污染、可再生、技术成熟，备受世人青睐。

本书图文并茂，以“功能块”为基本单元安排全书结构，主要介绍了大型风力发电机组的基本知识，包括大型风力发电机组的相关理论、定义、机构和工作机理，还包括运行、监控以及维护等应用方面的部分内容。为了便于阅读和理解，在保证内容完整的前提下，本书注重介绍如何解决应用中的实际问题，而非高深的数学推证和复杂的设计理论，力求能使读者全面掌握风力发电机组的结构和原理，了解风力发电机组的使用方法。

本书第1、3章由赵万清工程师主编，第2、4、5、7、9章由皮玉珍编写，第6、8章由赵晓焯编写。李姝玉、王健、刘旭慧在本书编写过程中帮忙整理资料，在此表示感谢。

本书涉及的学科比较多，要对这些内容都进行深入浅出的表述十分艰难，我们为此做了最大的努力。由于编者水平及时间有限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2018年10月

目 录

前言

1 概述	1
1.1 风力发电机组的结构和分类	1
1.2 风力发电机组的工作原理	5
1.3 典型的大中型风力发电机组	7
思考题	10
2 风轮的结构及原理	11
2.1 风轮的结构	11
2.2 叶片	13
2.3 轮毂	20
2.4 风轮的空气动力特性	22
思考题	25
3 风力发电机组的主传动和制动系统	26
3.1 主传动系统	26
3.2 制动系统	40
思考题	45
4 风力发电机组偏航、变桨距和液压系统	46
4.1 偏航系统	46
4.2 变桨距系统	52
4.3 液压系统	54
思考题	65
5 风力发电机组的控制系统	66
5.1 对风电机组控制系统的要求	66
5.2 定桨距风电机组的控制	68
5.3 变桨距风电机组的控制	72
5.4 发电机转子电流控制技术	78
思考题	82
6 风力发电机组的发电系统	83
6.1 发电机	83
6.2 发电系统	91
思考题	96

7 风力发电机组的辅助系统	97
7.1 支撑系统	97
7.2 冷却系统	114
7.3 润滑系统	116
思考题	117
8 风力发电系统的并网	119
8.1 并网原因	119
8.2 并网的要求	119
8.3 异步风力发电机的并网	120
8.4 同步风力发电机的并网	124
8.5 双馈风力发电机的并网	126
8.6 其他发电机的并网运行	129
思考题	132
9 风力发电机组的保护系统	133
9.1 风力发电机组的安全系统	133
9.2 风力发电机组的接地系统	139
9.3 风力发电机组的防雷保护	150
思考题	160
参考文献	161

1 概 述

本章主要介绍风力发电机组的结构、分类、工作原理以及典型的大中型风力发电机组。

1.1 风力发电机组的结构和分类

1.1.1 风力发电机组的整体结构

水平轴风力发电机组可分为叶轮（风轮）、机舱、塔筒和基础四大部分，如图 1-1 所示。其中，机舱是机组的核心部分。

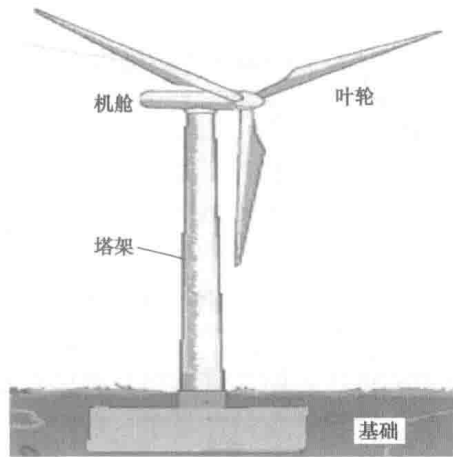


图 1-1 风力发电机组的基本结构

叶轮由叶片和轮毂组成。叶片具有空气动力外形，在气流作用下产生力矩驱动风轮转动，通过轮毂将转矩输入到主传动系统。机舱由底盘、整流罩和机舱罩组成，底盘上安装除主控制器以外的主要部件。机舱罩后部的上方装有风速和风向传感器，舱壁上有隔声和通风装置等，底部与塔架连接。塔架支撑机舱达到所需要的高度，其上安置发电机和主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。基础为钢筋混凝土结构，根据当地地质情况设计成不同的形式。其中心预置与塔架连接的基础部件，保证将风力发电机组牢牢地固定在基础上，基础周围还要设置预防雷击的接地装置。

1.1.2 大中型风力发电机组基本结构

大中型风力发电机组基本结构如图 1-2 所示。

1.1.3 传统风力发电机组的分类

表 1-1 为风力发电机组机型分类表。传统的风力发电机组的类型主要从两个方面来分，一是按功率大小来分，二是按结构形式来分。下面主要介绍第二种分类方法。

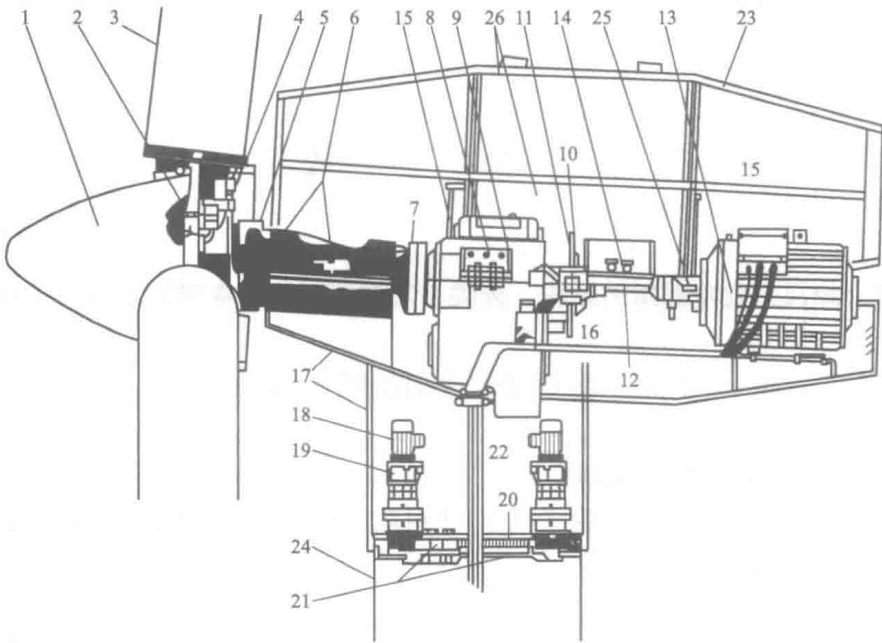


图 1-2 大中型风力发电机组基本结构

- 1—导流罩；2—轮毂；3—叶片；4—叶尖刹车控制系统；5—集电环；6—主轴；7—收缩盘；8—锁紧装置；
9—齿轮箱；10—刹车片；11—刹车片厚度检测器；12—万向联轴器；13—发电机；14—安全控制箱；
15—舱盖开启阀；16—刹车汽缸；17—机舱；18—偏航电机；19—偏航齿轮；20—偏航圆盘；
21—偏航锁定；22—主电缆；23—风向风速仪；24—塔筒；25—震动传感器；26—舱盖

表 1-1

风力发电机组机型分类

功率	风轮轴方向		功率调节方式			传动形式			转速变化		
	水平	垂直	定桨距	变桨距		有齿轮		直接驱动	定速	多态定速	变速
				主动失速	普通变距	高传动比	低传动比				
0.1~1kW 小型	常见	少见	常见	无	无	无	无	有	有	无	无
1~100kW 中型	常见	少见	常见	有	有	有	无	无	有	有	少见
100~1000kW 大型	常见	少见	常见	常见	常见	常见	少见	少见	有	有	常见
1000kW 以上特大型	常见	少见	少见	少见	常见	常见	少见	常见	少见	少见	常见

1. 按装机容量分

- (1) 小型 0.1~1kW。
- (2) 中型 1~100kW。
- (3) 大型 100~1000kW。
- (4) 特大型 1000kW 以上。

2. 按风轮轴方向分

(1) 水平轴风力发电机。水平轴风力机是风轮轴基本上平行于风向的风力发电机。工作时，风轮的旋转平面与风向垂直。图 1-3 所示为高速和低速水平轴风力机形式。风轮上的叶片是径向安置的，与旋转轴相垂直，并与风轮的旋转平面成一角度 φ （安装角）。

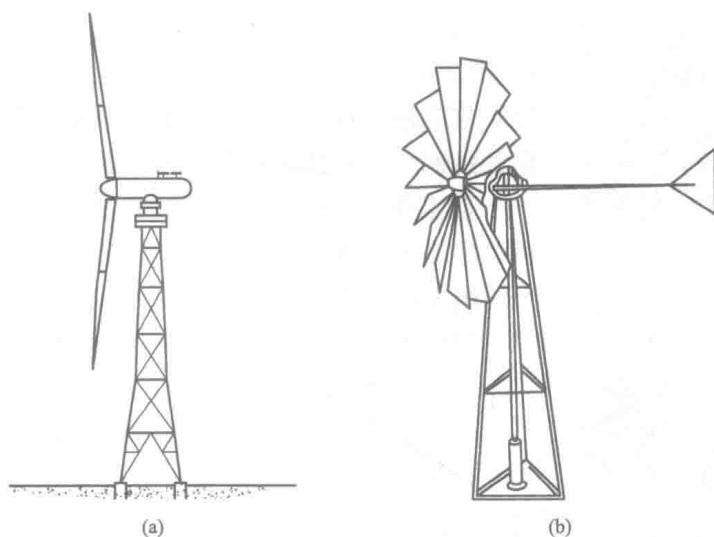


图 1-3 水平轴风力机
(a) 高速风力机；(b) 低速风力机

(2) 垂直轴风力发电机。垂直轴风力机是风轮轴垂直于风向的风力机，如图 1-4 所示。其主要特点是可以接收来自任何方向的风，因而当风向改变时，无需对风。由于不需要调向装置，使它们的结构更简单。垂直轴风力机的另一个优点是齿轮箱和发电机可以安装在地面上。但垂直轴风力发电机需要大量材料，占地面积大，目前商用大型风力发电机组采用较少。

3. 根据桨叶受力方式分类

可分为升力型风力机和阻力型风力机。升力型风力机主要是利用叶片上所受升力来转换风能的，是目前的主要形式。阻力型风力机主要是利用叶片上所受阻力来转换风能的，较少采用。

4. 根据桨叶数量分类

可分为单叶片、双叶片、三叶片和多叶片型风力机，其中常用的是三叶片型风力机。

5. 根据风轮设置位置分类

可分为上风向风力机和下风向风力机。

上风向风力机是风轮在塔架前面迎着风向旋转的风力机，大部分风力机采用上风向。上风向风力机必须有某种调向装置来保持风轮迎风。对小型风力机，这种对风装置采用尾舵；而对于大型风力机，则利用风向传感元件及伺服电动机组成的传动机构。

下风向风力机是风轮在塔架的下风位置顺着风向旋转的风力机，一般用于小型风力机。下风向风力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风轮，这样塔架就干扰了流过叶片的气流而形成所谓塔影效应，致使性能有所降低，如图 1-5 所示。

6. 根据机械传动方式分类

可分为有齿轮箱型风力机和无齿轮箱直驱型风力机。

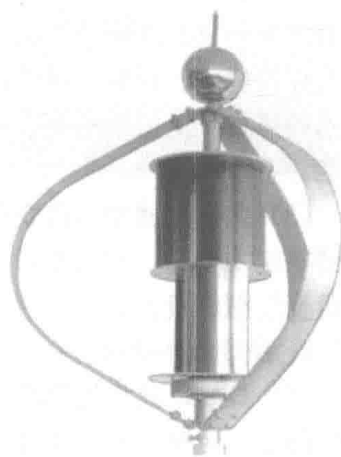


图 1-4 垂直轴风力发电机



图 1-5 下风向风力机

有齿轮箱型风力机的桨叶通过齿轮箱及其高速轴及万能弹性联轴器将转矩传递到发电机的传动轴，联轴器具有很好地吸收阻尼和振动的特性，可吸收适量的径向、轴向和一定角度的偏移，并且联轴器可阻止机械装置的过载。

直驱型风力机采用了多项先进技术，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，使风力机发出的电能同样能并网输出。这样设计简化了装置的结构，减少了故障概率，优点很多，多用于大型机组上。

7. 按功率调节方式分

(1) 定桨距风机。叶片固定安装在轮毂上，角度不能改变，风力发电机的功率调节完全依靠叶片的气动特性。当风速超过额定风速时，利用叶片本身的空气动力特性减小旋转力矩（失速）或通过偏航控制维持输出功率相对

稳定。

(2) 普通变桨距型（正变距）风机。这种风机当风速过高时，通过减小叶片翼型上合成气流方向与翼型几何弦的夹角（攻角），改变风力发电机组获得的空气动力转矩，能使功率输出保持稳定。同时，风机在起动过程也需要通过变距来获得足够的起动转矩。采用变桨距技术的风力发电机组还可使叶片和整机的受力状况大为改善，这对大型风力发电机组十分有利。

(3) 主动失速型（负变距）风机。这种风机的工作原理是以上两种形式的组合。当风机达到额定功率后，相应地增加攻角，使叶片的失速效应加深，从而限制风能的捕获，因此称为负变距型风机。

8. 按传动形式分

(1) 高传动比齿轮箱型。风力发电机组中的齿轮箱的主要功能是将风轮在风力作用下所产生的动力传递给发电机并使其得到相应的转速。风轮的转速较低，通常达不到发电机发电的要求，必须通过齿轮箱齿轮副的增速作用来实现，故也将齿轮箱称为增速箱。

(2) 直接驱动型。应用多极同步风力发电机让风力发电机直接拖动发电机转子运转在低速状态，这就没有了齿轮箱所带来的噪声、故障率高和维护成本大等问题，提高了运行可靠性。

(3) 中传动比齿轮箱（半直驱）型。这种风机的工作原理是以上两种形式的综合。中传动比型风机减少了传统齿轮箱的传动比，同时也相应地减少了多极同步风力发电机的极数，从而减小了发电机的体积。

9. 按转速变化分

(1) 定速。定速风力发电机组是指其发电机的转速是恒定不变的，它不随风速的变化而变化，始终在一个恒定不变的转速下运行。

(2) 多态定速。多态定速风力发电机组中包含着两台或多台发电机，根据风速的变化，可以有不同大小和数量的发电机投入运行。

(3) 变速。变速风力发电机组中的发电机工作在转速随风速时刻变化的状态下。目前，主流的大型风力发电机组都采用变速恒频运行方式。

10. 按风力发电机组的主要参数分

风力发电机组最主要的参数是风轮直径（或风轮扫掠面积）和额定功率。风轮直径决定机组能够在多大的范围内获取风中蕴含的能量。额定功率是正常工作条件下，风力发电机组的设计要达到的最大连续输出电功率。风轮直径应当根据不同的风况与额定功率匹配，以获得最大的年发电量和最低的发电成本，配置较大直径风轮供低风速区选用，配置较小直径风轮供高风速区选用。

1.1.4 无叶片风力机

传统风力机具有较大的叶片，旋转速度可达到 320km/h。虽然看上去非常壮观，但它们也会对鸟类生命构成威胁，并且产生巨大的噪声。2015 年，西班牙一家公司设计了一款无叶片风力发电机——Vortex Bladeless，如图 1-6 所示。

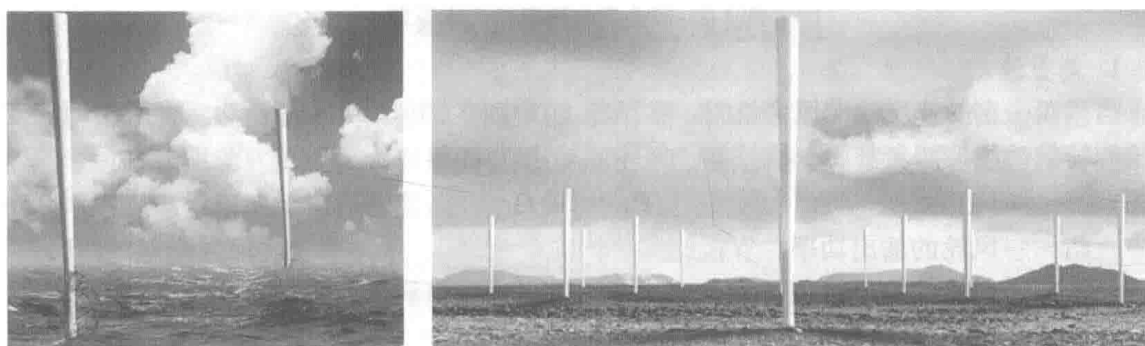


图 1-6 Vortex Bladeless 的形状

这种风力机由一根固定的桅杆、一台发电机（没有彼此连接的活动部件）和半刚性的玻璃纤维圆柱体组成，其工作原理是利用结构的振荡捕获风的动能，从而利用感应发电机或压电发电机将风的动能转变成电能输出。

与传统风力发电机相比，这种无叶片发电机有很多优点。它占地面积更小，不会发出任何的噪声；它的发电机接近地面，便于组装和维护；它取消了机舱、轮毂、变速器、叶片、制动装置、转向系统和支撑结构等，制造成本大大降低，可减少 53%，并且运输、制造和组织的过程也将简化；它将塔和发电机集成进一个结构，避免了机械部件的磨损和摩擦撕裂，部件或传动装置无需拆除维护及添加润滑油，使维护成本减少 80%，且持续工作的时间更长。产生同等数量的能源时，这种无叶片发电机比传统风力发电机所需要的成本低近 40%。

1.2 风力发电机组的工作原理

把风的动能转变成机械能，再把机械能转化为电能，这就是风力发电。风力发电所需的装置，称为风力发电机组。

在风力发电机组中，存在着两种物质流。一种是能量流，另一种是信息流。两者的相互作用，使机组完成发电功能。由于各种风力发电机组的结构不同，其工作原理也存在差异。图 1-7 所示是比较典型的风力机组的工作原理示意。

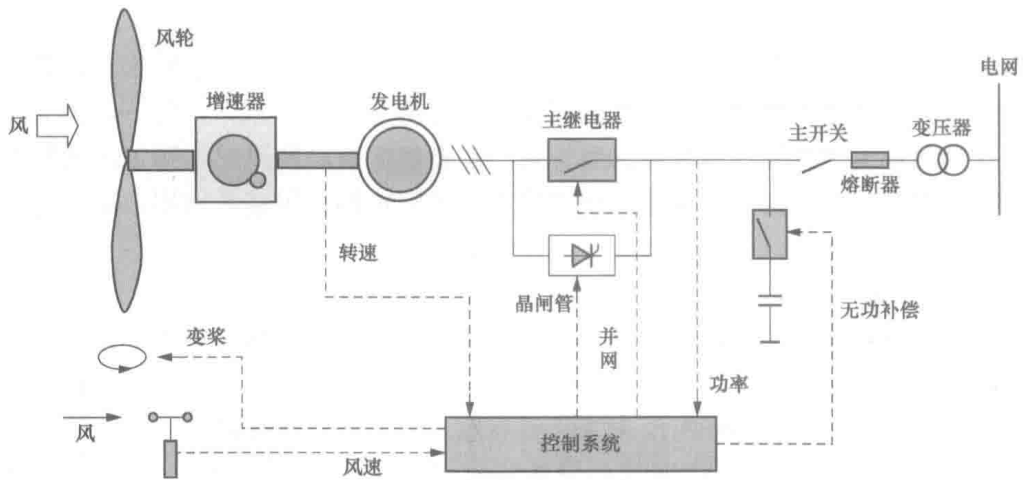


图 1-7 风力发电机组的工作原理

1. 能量流

当风以一定的速度吹向风力机时，在风轮上产生的力矩驱动风轮转动。将风的动能变成风轮旋转的动能，两者都属于机械能。风轮的输出功率为

$$P_1 = M_1 \Omega_1 \quad (1-1)$$

式中 P_1 ——风轮的输出功率，W；

M_1 ——风轮的输出转矩，N·m；

Ω_1 ——风轮的角速度，rad/s。

风轮的输出功率通过主传动系统传递。主传动系统可能使转矩和转速发生变化，于是有

$$P_2 = M_2 \Omega_2 = M_1 \Omega_1 \eta_1 \quad (1-2)$$

式中 P_2 ——主传动系统的输出功率，W；

M_2 ——主传动系统的输出转矩，N·m；

Ω_2 ——主传动系统的输出角速度，rad/s；

η_1 ——主传动系统的总效率。

主传动系统将动力传递给发电系统，发电机把机械能变为电能。发电机的输出功率为

$$P_3 = \sqrt{3} U_N I_N \cos \varphi_N = P_2 \eta_2 \quad (1-3)$$

式中 P_3 ——发电系统的输出功率，W；

U_N ——定子三相绕组上的线电压，V；

I_N ——流过定子绕组的线电流，A；

$\cos \varphi_N$ ——功率因数；

η_2 ——发电系统的总效率。

对于并网型风电机组，发电系统输出的电流经变压器升压后，即可输入电网。

2. 信息流

信息流的传递是围绕控制系统进行的。控制系统的功能是过程控制和安全保护。过程控制包括起动、运行、暂停、停止等。在出现恶劣的外部环境和机组零部件突然失效时应该紧急停机。风速、风向、风力发电机的转速、发电功率等物理量通过传感器变成电信号传给控制系统，它们是控制系统的输入信息。控制系统随时对输入信息进行加工和比较，及时地发出控制指令，这些指令是控制系统的输出信息。

对于变桨距风机，当风速大于额定风速时，控制系统发出变桨距指令，通过变桨距系统改变风轮叶片的桨距角，从而控制风电机组输出功率。在起动和停止的过程中，也需要改变叶片的桨距角。

对于变速型风机，当风速小于额定风速时，控制系统可以根据风的大小发出改变发电机转速的指令，以便使风力发电机最大限度地捕获风能。

当风轮的轴向与风向偏离时，控制系统发出偏航指令，通过偏航系统校正风轮轴的指向，使风轮始终对准来风方向。当需要停机时，控制系统发出停机指令，除了借助变桨距制动外，还可以通过安装在传动轴上的制动装置实现制动。实际上，在风电机组中，能量流和信息流组成了闭环控制系统。同时，变桨距系统、偏航系统等也组成了若干闭环的子系统，实现相应的控制功能。

1.3 典型的大中型风力发电机组

目前在风力发电机组中，两种最有竞争能力的结构形式是异步发电机双馈式机组和永磁同步发电机直接驱动式机组，大容量的机组大多采用这两种结构。下面分别介绍几种典型的大中型风力发电机组的结构和特点。

1.3.1 双馈式风力发电机组

传统的风力发电机组多应用异步发电机。风轮的转速范围是 $12\sim 200\text{r/min}$ ，而发电机转速为 $1000\sim 1500\text{r/min}$ ，风力发电机和发电机之间必须用增速箱连接。在风力发电中，当风力发电机组与电网并网时，要求机组发电的频率与电网的频率保持一致。

双馈式风力发电机组就是采用双馈异步发电机，转子通过变流器并网的一种变速恒频机组。双馈式风力发电机组的结构如图 1-8 所示，这是一种变桨距、变速型双馈式风力发电机组的内部结构。它的基本组成部分包括变桨距系统（设在轮毂之中。对于电力变距系统来说，包括变距电机、变距控制器、电池盒）、发电系统（包括发电机、变流器）、主传动系统

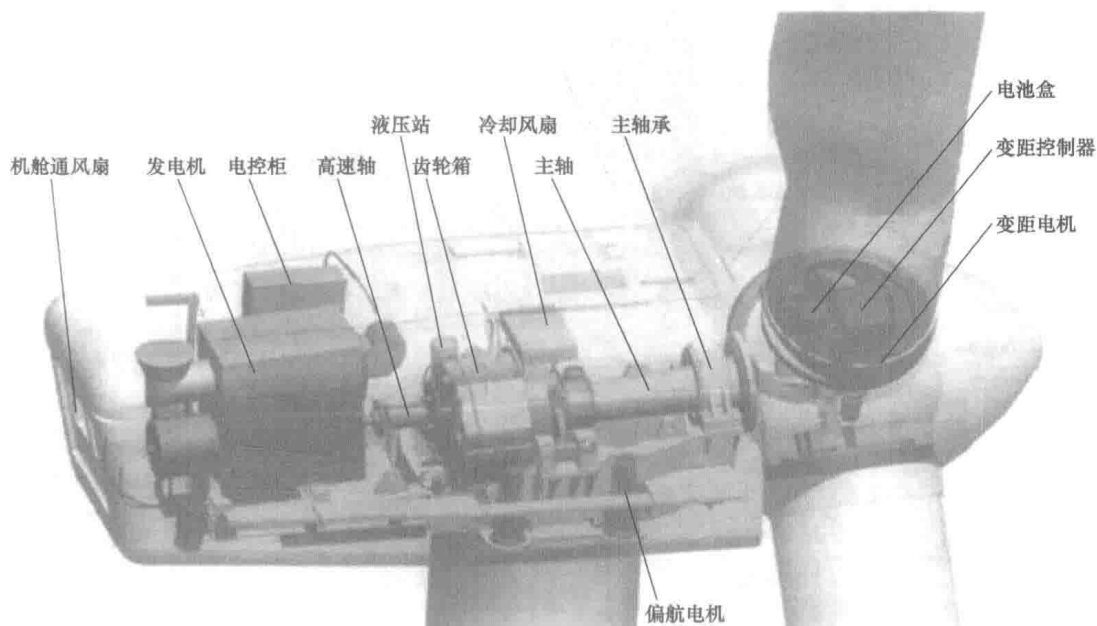


图 1-8 双馈式风力发电机组的结构

(包括主轴及主轴承、齿轮箱、高速轴和联轴器)、偏航系统(包括电动机、减速器、变距轴承和制动机构)、控制系统(包括传感器、电气设备、计算机控制系统和相应软件)和液压系统(包括液压站、输油管和执行机构)。

双馈风力发电机组的风轮将风能转变为机械转动的能量,经过齿轮箱增速驱动异步发电机,应用励磁变流器励磁而将发电机的定子电能输入电网。如果超过发电机同步转速,转子也处于发电状态,通过变流器向电网馈电。

齿轮箱可以将较低的风轮转速变为较高的发电机转速,同时也使得发电机易于控制,实现稳定的频率和电压输出。

发电机常采用交流励磁双馈型发电机。它的结构类似绕线转子异步发电机,只是转子绕组上加有集电环和电刷,这样,转子的转速与励磁的频率有关,从而使得双馈型发电机的内部电磁关系既不同于普通异步发电机又不同于同步发电机,但它却同时具有异步机和同步机的某些特性。

交流励磁变速恒频双馈发电机组的优点:允许发电机在同步速 $\pm 30\%$ 转速范围内运行,简化了调整装置,减少了调速时的机械应力,同时使机组控制更加灵活、方便,提高了机组运行效率;需要变频控制的功率仅是发电机额定容量的一部分,使变频装置体积减小,成本降低,投资减少;可以实现有功、无功功率的独立调节。

交流励磁变速恒频双馈发电机组的缺点:双馈风力发电机组必须使用齿轮箱,然而随着发电机组功率的升高,齿轮箱成本变得很高,且易出现故障,需要经常维护,同时齿轮箱也是风力发电系统产生噪声污染的一个主要因素;当低负荷运行时,效率低;发电机转子绕组带有集电环、电刷,增加维护和故障率;控制系统结构复杂。

1.3.2 直驱式永磁风力发电机组

风力发电机组也可以用多极永磁发电机直接连接风力发电机,这就是直接驱动发电机组。电力电子器件的发展促进了直驱式永磁风力发电机的研发和应用。

直接驱动式风力发电机组的结构如图 1-9 所示。

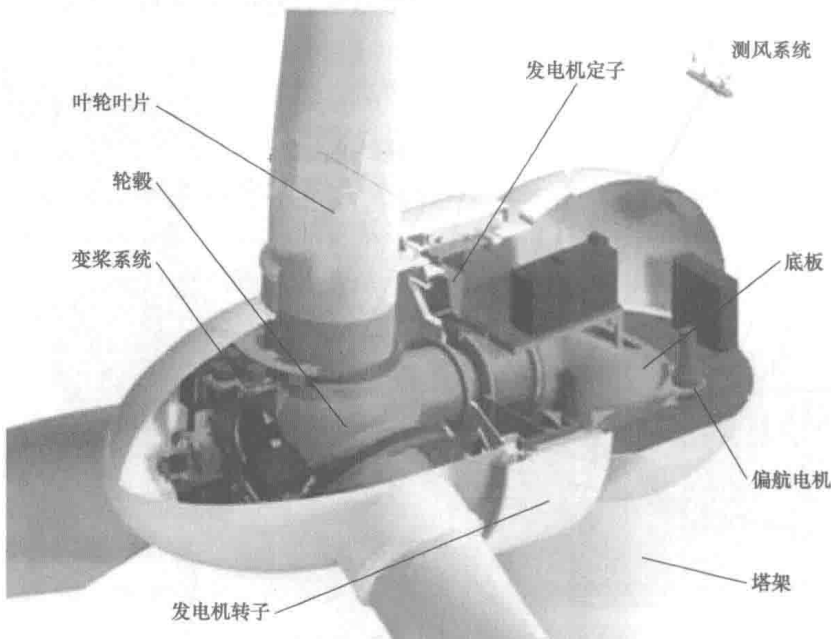


图 1-9 直驱式风力发电机组的结构

直驱永磁风力发电机组的发电机轴直接连接到风轮上，转子的转速随风速而改变，其交流电的频率也随之变化，经过大功率电力电子变流器，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。变速恒频控制是由定子电路实现的，因此变流器的容量与系统的额定容量相同。

直驱型风力发电机组的优点：由于传动系统部件的减少，提高了机组的可靠性，降低了噪声；永磁发电技术及变速恒频技术的采用提高了风电机组的效率；利用变速恒频技术，可以进行无功功率补偿。

直驱型风力发电机组的缺点：采用的多极低速永磁同步发电机，电机直径大，制造成本高；随着机组设计容量的增大，给电机设计、加工制造带来困难；定子绕组绝缘等级要求较高；采用全容量逆变装置，变流器设备投资大，增加控制系统成本；由于结构简化，使机舱重心前倾，设计和控制上难度加大。

1.3.3 半直驱（中传动比齿轮箱）型机组

这种机型的风力发电机采用了一级行星齿轮传动和适当增速比，把行星齿轮副与发电机集成在一起，构成了发电机单元。它采用单级变速装置以提高发电机转速，同时配以类似于直驱风电机的多极永磁同步发电机，介于高传动比齿轮箱型和直接驱动型之间（故又称半直驱机型）。发电机单元的主轴承与轮毂直接相连接。发电机单元经过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。

半直驱型机组的主要部件包括风轮叶片、轮毂、变桨系统、一级行星增速器集成多级低速发电机、变流器、控制器、偏航系统、测风系统、底板、塔架等，如图 1-10 所示。

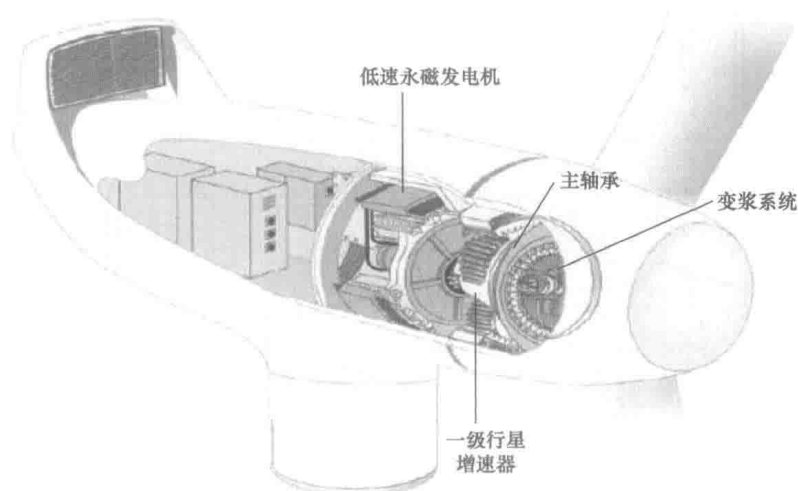


图 1-10 半直驱（中传动比齿轮箱）型机组的结构

半直驱型机组一级行星齿轮副的增速比一般只有双馈型风机的 $1/10$ 左右，风轮和发电机单元直接相连接，使风机所用的部件减少；发电机转速高，体积比直驱形式的风机有了较大的缩小，重量明显减轻。这些特点决定了半直驱型机组一方面能够提高齿轮箱的可靠性与使用寿命，同时相对直驱发电机而言，能够兼顾对应的发电机设计，改善大功率直驱发电机设计与制造条件。

思考题

1. 风力发电机组由哪几部分组成?
2. 风力发电机组有哪些分类方式?
3. 无叶片风力机有什么特点?
4. 风力发电机组的工作原理是什么?
5. 典型的大中型风力发电机组都有哪些?
6. 双馈式风力发电机组常采用什么发电机? 它有什么特点?
7. 直驱式风力发电机组的结构是什么样的?
8. 根据转速变化, 主流的大型风力发电机组都采用什么运行方式?
9. 半直驱(中传动比齿轮箱)型机组的结构是怎样的?
10. 变桨距、变速型的风力发电机组由哪几部分组成?

2 风轮的结构及原理

风轮是一种能将风的动能转换成另一种形式能量的旋转机械。本章介绍风轮的结构及其工作特性。

2.1 风轮的结构

2.1.1 水平轴风轮

水平轴式风轮有两叶、三叶、多叶式，顺风式和迎风式，扩散器式和集中器式，如图 2-1 所示。

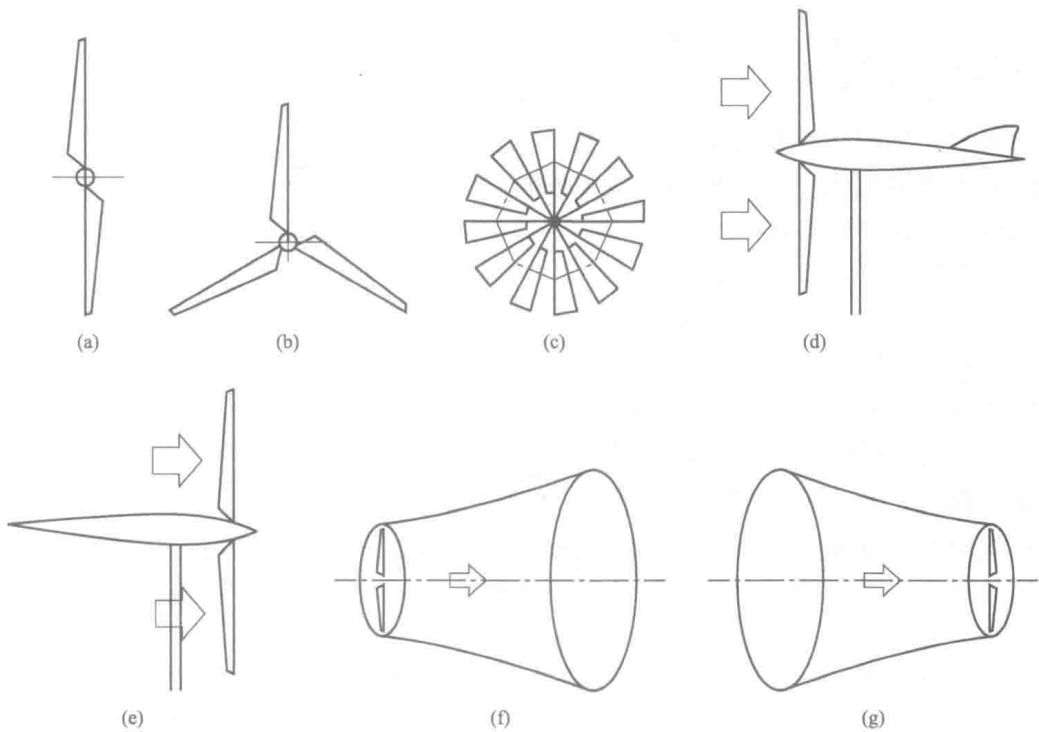


图 2-1 水平轴式翼式风轮桨叶

(a) 两叶式；(b) 三叶式；(c) 多叶式；(d) 迎风式；(e) 顺风式；(f) 扩散器式；(g) 集中器式

水平轴风轮围绕一根水平轴旋转，工作时，风轮的旋转平面与风向垂直，如图 2-2 所示。

风轮上的叶片是径向安置的，垂直于旋转轴，与风轮的旋转平面成一角度 φ (安装角)。风轮叶片数目的多少视风轮的用途而定。用于风力发电的大型风轮叶片数一般取 1~4 片