



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）
新能源系列教材

风力发电机组 运行与维护

邵联合 周建强 主 编

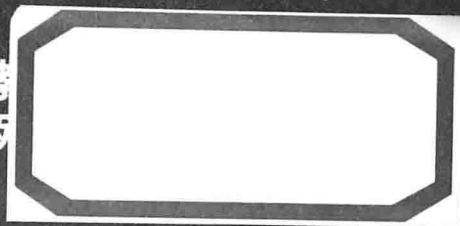
张 伟 张梅有 逯登龙 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育
新能源系列



材 (高职高专教育)

风力发电机组 运行与维护

主 编	邵联合	周建强	
副主编	张 伟	张梅有	逯登龙
编 写	安喜伟		
主 审	劳思维	马虎林	



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）。本书采用图文并茂的方式，重点介绍了兆瓦级风力发电机组的传动系统、液压系统、偏航系统、变桨系统、控制系统、安全保护系统的基本结构、运行特点、控制过程及其日常巡检和维护知识。

本书可作为高职高专新能源相关专业学生、教师的教学用书，也可作为风电场运行与维护人员的培训教材。

图书在版编目（CIP）数据

风力发电机组运行与维护/邵联合，周建强主编. —北京：中国电力出版社，2014.3

普通高等教育“十二五”规划教材 高职高专教育新能源系列教材

ISBN 978-7-5123-5309-1

I. ①风… II. ①邵…②周… III. ①风力发电机-发电机组-运行-高等学校-教材②风力发电机-发电机组-维修-高等学校-教材 IV. ①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 003697 号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 3 月第一版 2014 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本^{*} 17.5 印张 427 千字

定价 31.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

风能是目前最具规模化开发利用条件的清洁可再生能源之一,风力发电是风能利用最主要的方式。近年来,风力发电技术迅猛发展,目前我国已成为世界上风力发电技术发展最快的国家之一。

我国于2010年建立起了完备的风力发电工业体系,风电技术和装备能力达到国际先进水平,计划到2020年全国风电装机容量达到3000万kW。风力发电产业要得到长足发展,必须有足够的智力支持和人才保障。目前全国的风电企业众多,包括制造、安装、运行与维护企业,未来15年,将需要4万名大、中专毕业生从事风电产业,特别是风电场运行维护岗位人员需求量最大。近几年来,很多院校相继开设了风力发电专业,但与现场结合紧密、特别适合实践教学的教材还不多。

本书以兆瓦级风力发电机组为研究对象,坚持理论够用为度,尽量避开烦琐的数学推导,重点介绍了风力发电机组运行与维护中需要解决和处理的实际问题,体现了内容的先进性和实用性,力求使读者熟悉行业标准和技术规范,掌握操作方法,学以致用。

本书由保定电力职业技术学院邵联合和郑州电力高等专科学校周建强担任主编,山西电力职业技术学院张伟、国网宁夏电力公司培训中心张梅有、中广核(张北)风力发电有限公司逯登龙担任副主编,河北红松风力发电有限公司安喜伟也参与了教材的编写工作。具体分工为周建强编写项目一,张梅有编写项目二,逯登龙编写项目三和项目四,安喜伟编写项目五,张伟编写项目六,邵联合编写项目七、项目八和附录部分,全书由邵联合负责统稿。教材编写团队中有多位成员来自生产一线,长期从事风电设备运行维护和职工培训鉴定工作,有着丰富的现场实践经验。

本书由河北红松风力发电有限公司主任级工程师劳思维和中广核(张北)风力发电有限公司主任级工程师马虎林主审,对本书提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,参考了大量网上资料及出版物,在此谨向各位作者表示诚挚的谢意。

由于风力发电技术涉及面广,知识发展更新快,加之编者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,恳请广大读者朋友批评指正。

编 者

2013年12月

目 录

前言

项目一 风力发电机组的认识..... 1

 任务一 认识风力发电机组..... 1

 任务二 风力发电机组运行基本操作 14

 任务三 维护检修工具的使用 20

 小结 29

 复习思考 29

项目二 传动系统运行与维护 30

 任务一 风轮维护 30

 任务二 齿轮箱维护 38

 任务三 主轴、轴承、高速闸、联轴器的维护 48

 任务四 发电机运行与维护 54

 小结 58

 复习思考 60

项目三 偏航系统运行与维护 61

 任务一 偏航系统的认知 61

 任务二 偏航系统的维护 71

 任务三 偏航系统常见故障的检查及处理 74

 小结 76

 复习思考 77

项目四 变桨系统运行与维护 78

 任务一 变桨系统的认知 79

 任务二 变桨系统运行与维护 81

 任务三 变桨系统常见故障的检查及处理 93

 小结 97

 复习思考 97

项目五 液压系统运行与维护 98

 任务一 动力元件的认知与维护 99

 任务二 控制元件的认知与维护..... 103

 任务三 执行元件的认知与维护..... 125

 任务四 辅助元件的认知与维护..... 131

任务五 液压回路的认知与维护·····	139
任务六 液压系统的运行与维护·····	150
小结·····	154
复习思考·····	155
项目六 控制系统运行与维护·····	157
任务一 主控系统的运行与维护·····	158
任务二 变流系统的维护·····	171
任务三 软并网系统的运行与维护·····	182
小结·····	184
复习思考·····	185
项目七 安全保护系统维护·····	186
任务一 认识安全链·····	186
任务二 认识防雷与接地系统·····	194
任务三 防雷接地系统的安装与维护·····	203
小结·····	210
复习思考·····	212
项目八 兆瓦级风力发电机组维护与检修·····	213
任务一 兆瓦级永磁同步直驱风力发电机组的认识·····	213
任务二 风力发电机组定期巡检与维护·····	222
任务三 风力发电机组常见故障及处理·····	236
小结·····	252
复习思考·····	252
附录 A 现场安全规范·····	254
附录 B 兆瓦级风力发电机组定期维护项目·····	265
附录 C 工具的使用与管理·····	269
参考文献·····	273

项目一 风力发电机组的认识



【项目描述】

风力发电机组是风力发电场的主力设备。风力发电机组运行状态的好坏,不但直接影响其使用寿命,而且直接关系到风能利用率和整个风力发电场的经济效益,甚至电网的安全运行。同时风力发电机组也是一个涉及流体、机械、电气及自动控制多学科知识的复杂设备,运行维护人员首先要对风力发电机组有一个整体的认识。

本项目将完成以下三个工作任务:

任务一 认识风力发电机组

任务二 风力发电机组运行基本操作

任务三 维护检修工具的使用



【学习目标】

- (1) 了解风力发电机组的基本结构及各组成部分的工作特点。
- (2) 了解双馈发电机组和永磁直驱发电机组的结构特点。
- (3) 理解大型并网风力发电机组的启动、停机、并网、偏航、变桨、脱网等基本含义。
- (4) 掌握常用风力发电机组维修工具的使用方法。



【本项目学习重点】

- (1) 双馈型和永磁型两类风力发电机组的基本结构和工作特点。
- (2) 常用风力发电机组维修工具的使用方法。



【本项目学习难点】

- (1) 双馈风力发电机组和永磁直驱风力发电机组的结构及工作原理。
- (2) 风力发电机组的启动、停机、并网、偏航、变桨、脱网等基本动作过程。

任务一 认识风力发电机组



【任务引领】

了解风力发电机组的基本结构和工作原理是进行风力发电机组运行检修的基础。只有从整体上对风力发电机组有一个全面系统的认识,才能为后续系统部件的检修维护打下良好的基础。



【教学目标】

- (1) 正确比较各类风力发电机组的不同结构和运行特点。

(2) 了解变桨、偏航、变流等系统的基本动作过程。



【任务准备与实施建议】

(1) 通过查阅相关资料,了解风力发电的工作原理,熟悉现代大型风力发电机组的基本组成和工作特点。

(2) 到风电场全面了解风力发电机组的运行特点和动作过程。

(3) 绘制风力发电机组系统示意图,并正确描述各组成部分的主要功能。



【相关知识的学习】

一、风力发电机组的分类

风力发电机组主要从功率大小和结构等方面进行分类。

1. 按功率分

按功率划分,风力发电机组习惯上可分为小型($0.1\sim 1\text{kW}$)、中型($1\sim 100\text{kW}$)、大型($100\sim 1000\text{kW}$)和特大型(大于 1000kW)。

2. 按风轮轴方向分

(1) 水平轴风力发电机组。风轮轴基本上平行于风向,工作时风轮的旋转平面与风向垂直,见图 1-1。

(2) 垂直轴风力发电机组。风轮轴垂直于风向的风力发电机组。可接收来自任何方向的风,因而当风向改变时,无需对风,不需要调向装置,结构简单,见图 1-2。齿轮箱和发电机可以安装在地面上,维护检修方便。但垂直轴风力发电机组需要大量材料,占地面积大,目前商用大型风力发电机组较少采用。



图 1-1 水平轴风力发电机组



图 1-2 垂直轴风力发电机组

3. 按功率调节方式分

(1) 定桨距风力发电机组。叶片固定安装在轮毂上,角度不能改变,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(正变距)风力发电机组。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，机组在启动过程中也需要通过变桨距来获得足够的启动转矩。采用变桨距技术的风力发电机组还可改善叶片和整机的受力状况，对大型风力发电机组十分有利。

（3）主动失速型（负变距）风力发电机组。工作原理是上述两种形式的组合，当机组达到额定功率后，相应增加攻角，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。

4. 按传动形式分

（1）高速传动比齿轮箱型。风力发电机组中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，必须通过齿轮箱增速来实现。

（2）直接驱动型。应用多级同步发电机可以去掉常见的传动系统，使风轮直接拖动发电机转子运转。在低速状态，没有传动系统所带来的噪声、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。这种风力发电机组的工作原理是上述两种形式的综合。中传动比齿轮箱型风力发电机组减少了传统齿轮箱的传动比，同时也相应地减少了多级同步发电机的级数，从而减小了发电机的体积。

5. 按转速变化

（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，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。

目前最常见的大型风力发电机组主要有恒速恒频发电机组和变速恒频发电机组两种结构类型。

二、风力发电机组的基本结构

从外观结构上看，风力发电机组主要由风轮、机舱、塔架和基础组成，如图 1-3 所示。在风力的作用下，风轮开始旋转，通过机舱内的传动系统，带动发电机转子旋转并开始发电，从而完成“风能—机械能—电能”的转换。

1. 基础

基础在风力发电机组的最下部，是主要的承载部件。主要承受上部塔架传来的机组的全部竖向荷载、水平荷载，包括机组自身重量、风荷载、风轮旋转产生的力矩、机组调向时产生的扭矩等复杂荷载。

目前大型风电机组多采用钢筋混凝土基础，按结构分主要有厚板块、多桩和单桩等几种形式，见图 1-4。距地表不远处就有硬性土质时，宜采用梁板式基础；地层土质比较疏松时宜采用桩基础。

2. 塔架

见图 1-5。现代大型风力发电机组多采用圆筒形钢制塔架。塔

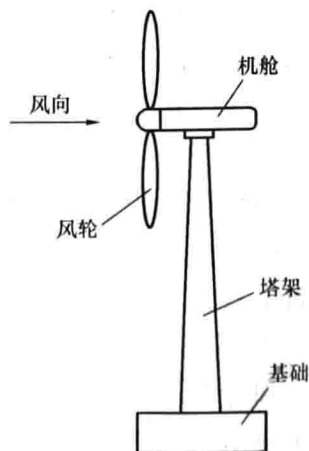


图 1-3 风力发电机组的结构

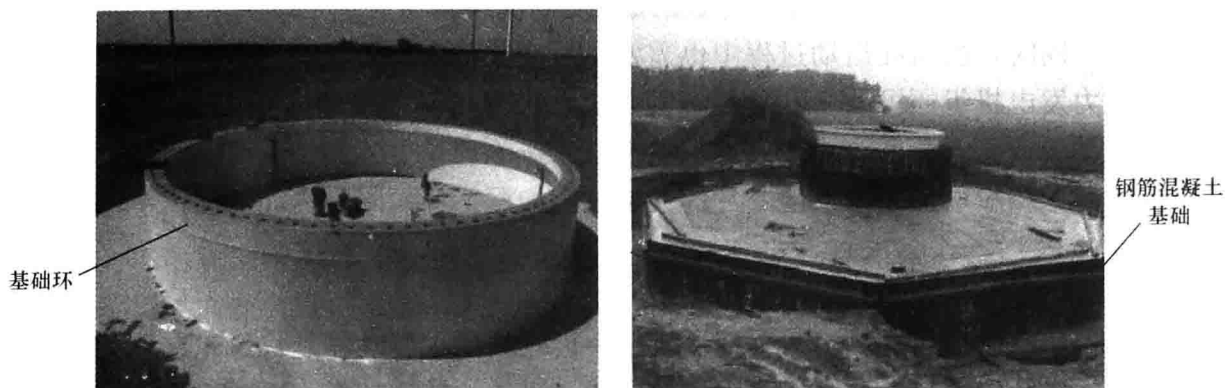


图 1-4 风力发电机基础

架是主要的承载部件，用来把机组上部的荷载传递给基础。塔架主要由塔筒、塔门、塔梯、平台、电缆架及照明设备组成，有些塔筒内布置有升降机。

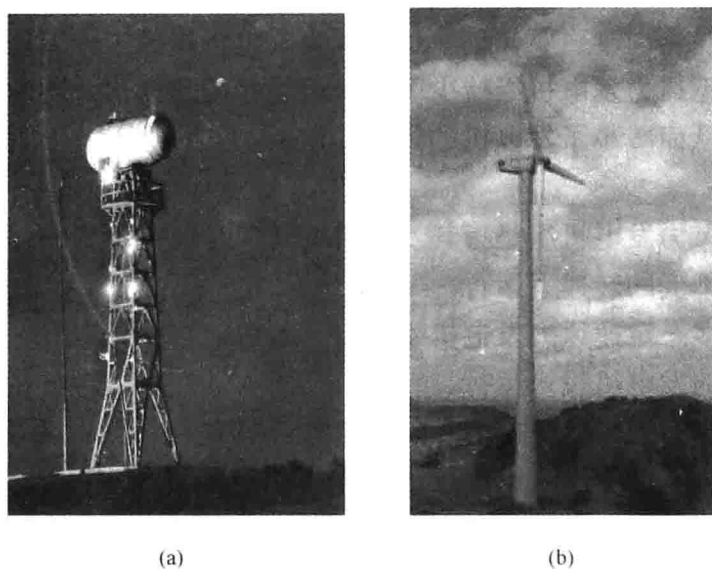


图 1-5 风力发电机塔架

(a) 桁架式；(b) 圆筒式

(1) 塔筒。塔筒是塔架的主要承力部件。现代风轮塔架一般高 60~90m。为了吊装及运输方便，一般将塔架分成若干段塔筒，在底段塔筒底部内、外侧或单侧设法兰盘，其余连接段的内侧设法兰盘，采用螺栓连接。塔架的高度决定风力发电机组的高度，通常高度越高，风力越大。由于风力发电场的风速不同，为了在最佳的风速运行，塔架的高度也不相同。

(2) 平台。为了安装相邻段塔筒和供检修人员攀爬中间休息，塔架中设置若干平台。通常在塔门位置设置一个基础平台，在中间段还要设置 2~3 个检修平台。

(3) 内外爬梯。为了检修方便，在地面到舱门设置外梯，在基础平台到机舱设置内梯或垂直电梯。外梯通常设置成倾斜直梯或螺旋梯，内梯通常设置成垂直爬梯。

3. 风轮系统

风轮是将风能转换为机械能的装置，是风力发电机组的核心部件。现代用于并网发电的风力发电机组多采用水平轴迎风式，双叶或三叶机型（见图 1-6），功率从几千瓦到几兆瓦，风轮的功率大小取决于风轮直径。

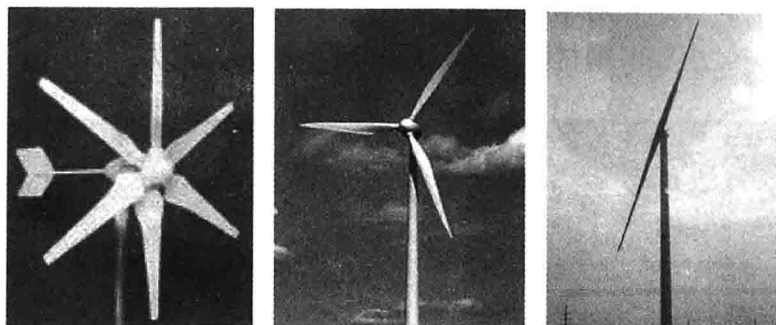


图 1-6 不同叶片数量的风力发电机组

风轮主要由叶片、轮毂、导流罩和变桨系统的执行机构组成。

(1) 叶片。风力发电机组的风轮叶片是接受风能的主要部件，见图 1-7。叶片的翼型设计、结构形式直接影响风力发电装置的性能和功率，是风力发电机组中最核心的部分之一。

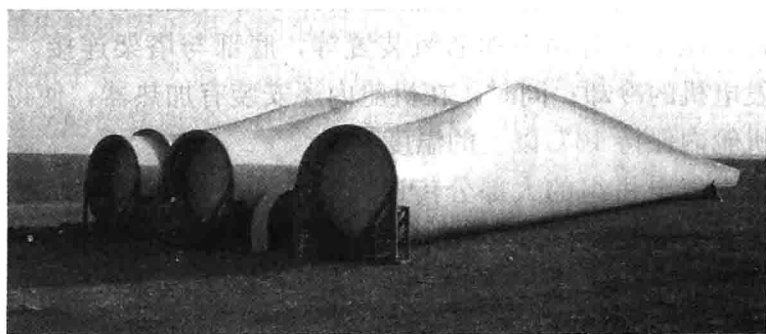


图 1-7 叶片

(2) 轮毂。轮毂是风力发电机组中的重要部件，它连接主轴和叶片，将风轮的扭矩传递给齿轮箱或发电机。轮毂通常有球形和三圆柱形两种，见图 1-8。连接叶片法兰的夹角为 120° ，风机轮毂铸件的直径约为 3m，重达 8t，重要部位壁厚达 160mm，由球墨铸铁铸造而成。

(3) 变桨系统的执行机构。变桨系统是风力发电机组中调节功率的装置，它包括三个主要部件，即驱动装置（电动机）、齿轮箱和变桨轴承，见图 1-9。通过在叶片和轮毂之间安装的变桨驱动电动机带动回转轴承转动从而改变叶片迎角，由此控制叶片的升力，以达到控

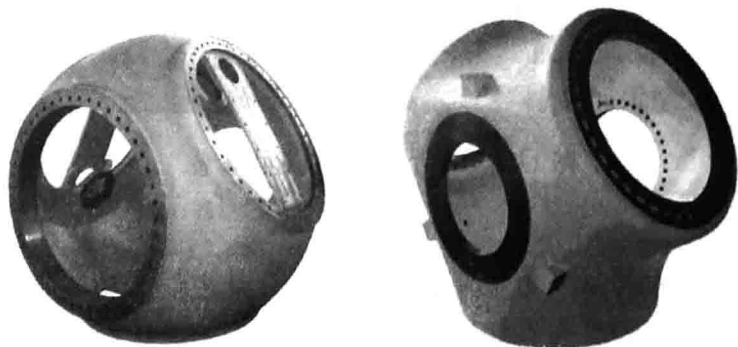


图 1-8 轮毂的结构

制作用在风轮叶片上的扭矩和功率的目的。

(4) 导流罩。一般用玻璃钢材料制造，用来减小对风的阻力，见图 1-10。

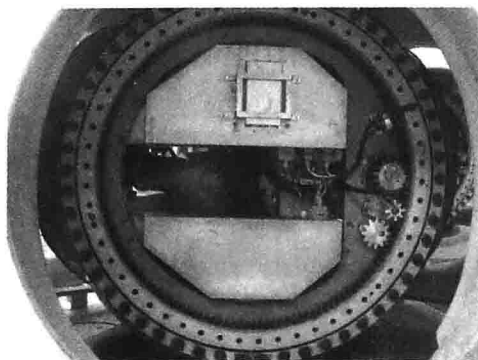


图 1-9 变桨系统

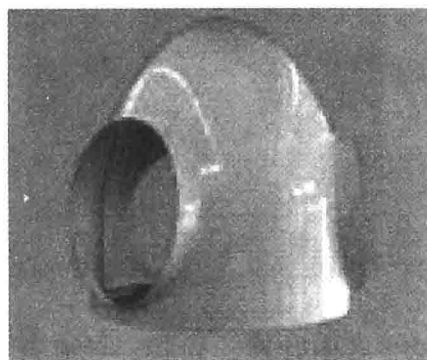


图 1-10 风力发电机导流罩

4. 机舱

机舱由底盘和机舱罩组成，底盘上安装除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。机舱上安装有散热器，用于齿轮箱和发电机的冷却；同时，在机舱内还安装有加热器，使得风力发电机组在冬季寒冷的环境下，机舱内保持 10°C 以上的温度。

机舱内安装有风力发电机组的大部分传递、发电、控制等重要设备，包括主轴、齿轮箱、发电机、液压装置、偏航装置和电控柜等，如图 1-11 所示。

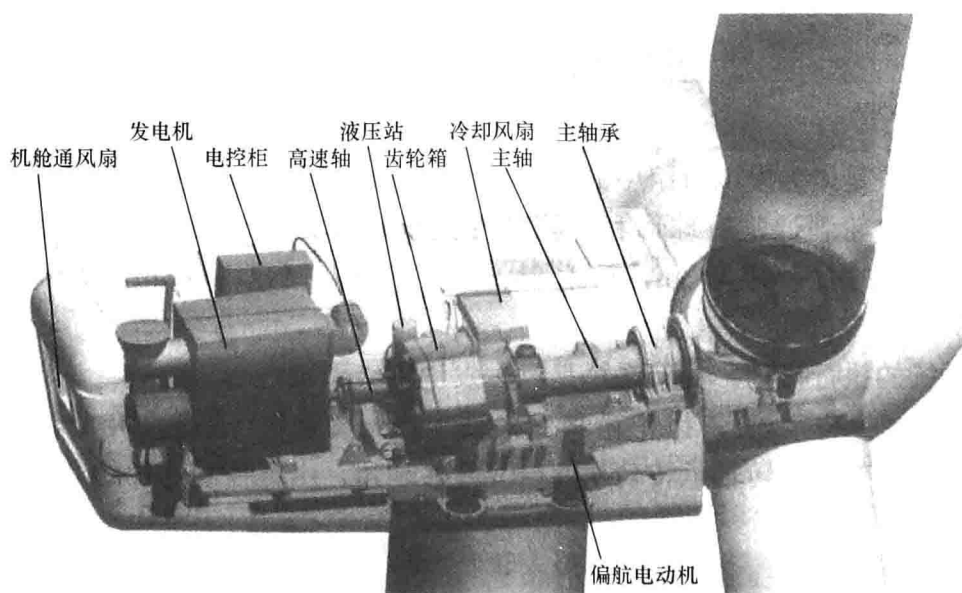


图 1-11 风力发电机机舱内设备

5. 增速齿轮箱系统

风力发电机组中的齿轮箱是一个重要的机械部件，其主要的功能是将风轮在风力作用下产生的动力传递给发电机并使其得到相应的转速。风轮的转速很低，远达不到发电机组的要求，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。图 1-12 所示为

齿轮箱典型结构示意图。

6. 发电机

发电机是将其他形式的能源转换成电能的机械设备。发电机的种类很多，其工作原理都是基于电磁感应定律和电磁学及力学定律。

发电机通常由定子、转子、外壳（机座）、端盖及轴承等部件构成。

定子由定子铁芯、定子绕组、机座、接线盒以及固定这些部件的其他机构件组成。

转子由转子轴、转子铁芯（或磁极、磁轭）、转子绕组、护环、中心环、集电环及风扇等部件组成。

发电机分为同步发电机和异步发电机两个主要类型。同步发电机运行的频率与其所连电网的频率完全相同，也被称为交流发电机；异步发电机运行时的频率比电网频率稍高，常被称为感应发电机。风力发电机组的发电机一般采用异步发电机，异步发电机的转速取决于电网的频率，只能在同步转速附近很小的范围内变化。

同步发电机中的转子有一个通直流电的绕组，称为励磁绕组，励磁绕组建立一个恒定的磁场锁定定子绕组建立的旋转磁场。因此，转子始终能以一个恒定的与定子磁场和电网频率同步的恒定转速旋转。在某些设计中，转子磁场是由永磁机或永磁体产生的。

异步发电机的转子是由一个两端都短接的鼠笼形绕组构成的。转子与外界没有电的连接，转子电流由转子切割定子旋转磁场的相对运动产生。如果转子速度完全等于定子旋转磁场的速度（与同步发电机一样），就没有相对运动，也就没有转子感应电流。因此，异步发电机总的转速总是比定子旋转磁场速度稍高。

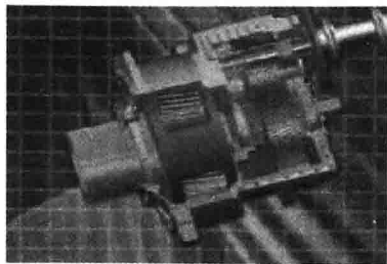


图 1-12 典型齿轮箱结构示意图

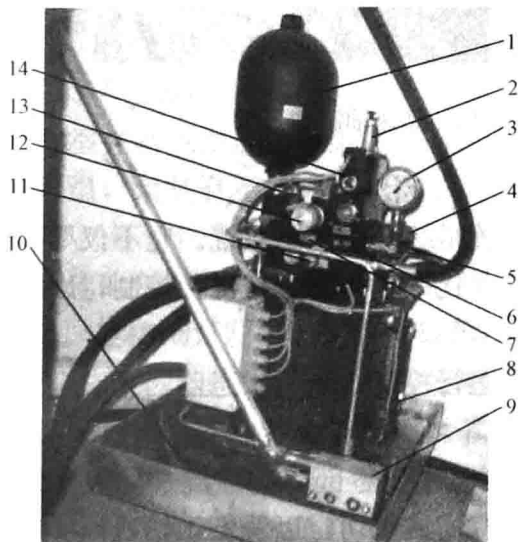


图 1-13 液压系统

- 1—蓄能器；2—偏航余压阀；3—压力表；
4—空气过滤器；5、6、7—手动阀；
8—油位计；9—手动泵；10—放油
阀；11—压力继电器；12、14—电
磁阀；13—安全阀

7. 偏航系统

由于自然风风向的不确定性和风的不稳定性，风轮需要反复地偏航对风以获得最大功率。如果风轮扫掠面和风向不垂直，则不但功率输出减少，而且承受的载荷更大。偏航系统的功能就是跟踪风向的变化，驱动机舱围绕塔架中心线旋转，使风轮扫掠面与风向保持垂直。

8. 液压系统

液压系统是以液体为介质，实现动力传输和运动控制的机械装置，见图 1-13。它具有传动平稳、功率密度大、容易实现无级调速、易于更换元器件和过载保护等优点。在大型风力发电系统中，广泛应用液压系统实现偏航刹车及转子刹车功能。

9. 制动系统

制动系统是风力发电机组中起制动作用装置的总称，一般包括气动制动装置和机械制动装置。

(1) 空气动力制动。当风力发电机组处于运行

状态时，叶尖扰流器作为桨叶的一部分起吸收风能的作用，保持这种状态的动力来自风力发电机组中的液压系统。液压系统提供的液压油通过旋转接头进入安装在桨叶根部的液压缸，压缩叶尖扰流器机构中的弹簧，使叶尖扰流器与桨叶主体联为一体。当风力发电机组需要停机时，液压系统释放液压油，叶尖扰流器在离心力作用下，按设计的轨迹转过 90° ，在空气阻力下起制动作用，见图 1-14。变桨距风力发电机组的空气动力刹车是通过桨距角的变化来实现的。

(2) 机械制动机构。机构制动机构由安装在低速轴或高速轴上的刹车圆盘与布置在四周的液压夹钳构成。液压夹钳固定，刹车圆盘随轴一起转动，见图 1-15。液压夹钳有一个预压的弹簧制动力，液压力通过油缸中的活塞将夹钳打开。机械制动机构的预压弹簧制动力，一般要求在额定负载下脱网时能够保证风力发电机组安全停机。但在正常停机的情况下，液压力并不是完全释放的，即在制动过程中只作用了一部分弹簧力。因此，在液压系统中设置了一个特殊的减压阀和蓄能器，以保证在制动过程中不完全提供弹簧的制动力。为了监视机械制动机构的内部状态，夹钳内部装有温度传感器和指示刹车片厚度的传感器。

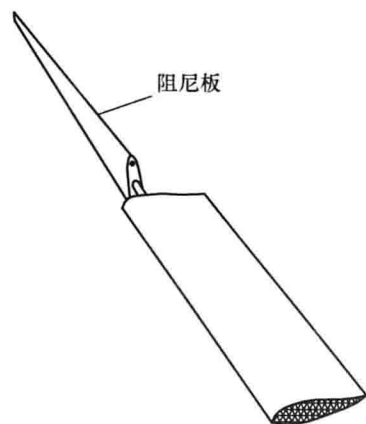


图 1-14 定桨距叶尖制动系统

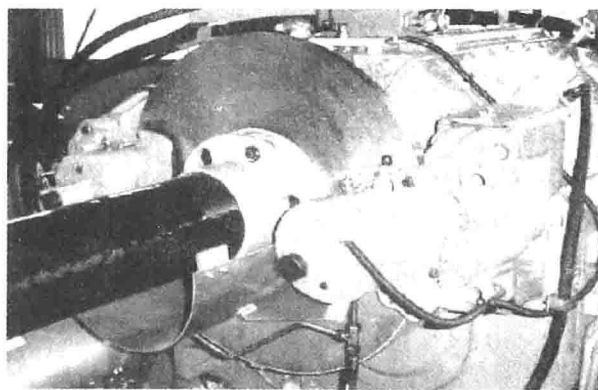


图 1-15 高速轴制动系统

10. 电气及控制系统

与一般工业控制过程不同，风力发电机组的控制系统是综合性控制系统。它不仅要监视电网工况和机组运行参数，而且还要根据风速与风向的变化，对机组进行优化控制，以提高机组的运行效率和发电量。

(1) 电气控制系统的功能。电控系统通常包括正常运行控制、运行状态监测和安全保护三方面的职能。

1) 正常运行控制。包括机组自动启停、变流器并网、主要零部件的除湿加热、液压系统启停、散热器启停、偏航及自动解缆、电容补偿和电容滤波投切，以及低于切入风速时的自动停机等。

2) 监控功能。主要包括电网电压、频率，发电机输出的电流、功率、功率因数，风速，风向，叶轮转速，液压系统状况，偏航系统状况，风力发电机组关键设备的温度及舱外温度等。

3) 安全保护。安全保护系统可以分为计算机系统、独立于计算机的安全链、器件本身的保护措施三层结构。机组采用两套相互独立的保护机构，一套是可编程逻辑控制器

(PLC) 软件控制的保护系统, 由 PLC 对安全链的节点进行监控, 任何一个节点发生故障后, 主控制程序都会向变桨系统发出急停请求; 另一套为独立于计算机系统的安全链, 安全链是一个硬回路, 由所有能触发紧急停机的触点串联而成, 任何一个触发都会导致紧急停机。

(2) 电控系统的组成。风力发电机组的电气控制系统由低压电气柜、电容柜、主控制柜、变流柜、机舱控制柜、变桨控制柜、传感器以及连接电缆组成。

1) 低压电气柜。风力发电机组的主配电系统, 连接发电机与电网, 为机组中的各执行机构提供电源, 同时也是各执行机构的强电控制回路。

2) 电容柜。为了提高变流器整流效率, 在发电机与整流器之间设计有电容补偿回路, 提高发电机的功率因数。为了保证电网供电的质量, 在逆变器与电网之间设计有电容滤波回路。

3) 主控制柜。机组可靠运行的核心, 主要完成数据采集及输入、输出信号处理; 逻辑功能判断; 对外围执行机构发出控制指令; 与机舱柜、变桨柜通信, 接收机舱和轮毂内变桨系统信号; 与中央监控系统通信, 传递信息。

4) 变流柜。变流系统主要完成电流频率的变换。在双馈发电系统中, 为双馈发电机励磁系统提供励磁电流; 在永磁同步风力发电系统中, 将发电机输出的非工频电流通过变流柜变成工频电流并入电网。

5) 机舱控制柜。主要是采集机舱内各个传感器、限位开关的信号; 采集并处理叶轮转速、发电机转速、风速、温度、振动等信号。

6) 变桨控制器。实现风力发电机组的变桨控制, 在额定功率以上通过控制叶片桨距角使输出的功率保持在额定状态, 停机时, 调整桨距角度, 使风力发电机组处于安全状态下。

7) 并网柜。实现并网的功能, 保护断路器的功能, 分配系统电源的功能, 同时与主控制柜保持通信。

三、机组运行原理

大型并网风力发电机组主要有定桨距机组、双馈式机组、永磁同步直驱式机组等多种类型的机组, 最具有竞争力的结构形式是双馈式风力发电机组和永磁同步直驱风力发电机组。

1. 双馈型风力发电机组

风速时刻都在变化, 而电网的频率必须保持一个几乎恒定的值 (我国电网频率为 50Hz)。最初风力发电机组大多以恒速恒频的方式实现并网发电。随着机组向大型化发展, 发电机在很大风速范围内按最佳效率运行的重要优点越来越引起人们的重视。双馈风力发电机组是一种风轮叶片桨距角可以调节, 同时采用双馈型发电机, 发电机可以变速, 并输出恒频恒压电能的机组。在低于额定风速时, 它通过改变叶片桨距角使风力发电机组在最佳叶尖速比下运行, 输出最大的功率; 而在高风速时通过改变叶片桨距角使风力发电机组功率输出稳定在额定功率, 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, 所以称为双馈发电机组。目前双馈风力发电机组已成为大型并网风力发电机组的主力机型。

(1) 双馈风力发电机组基本结构。双馈式风力发电机组从下到上由基础、塔筒、机舱、风力发电机几部分组成。在塔筒内底部, 布置有变流柜、并网柜; 在机舱和塔筒连接处布置有偏航系统; 在机舱内部有低速轴与风力机相连, 接着是齿轮箱、高速轴和双馈风力发电

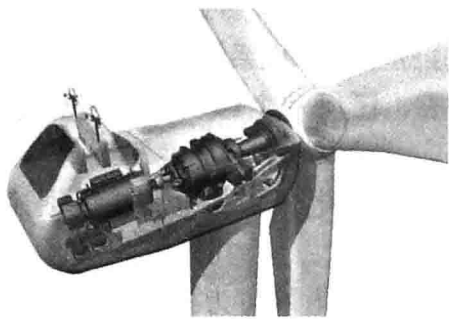


图 1-16 双馈风力发电机组

机；另外在机舱内还布置有控制柜、液压站等装置；在机舱外上端尾部布置有测量风速、风向的传感器，见图 1-16。

(2) 双馈风力发电机组工作原理。

1) 变桨。变桨距风力发电机组与定桨距相比，在额定功率点以上可输出功率平稳。当功率在额定值以下时，控制器将叶片桨距角置于 0° ，不作变化，可认为等同于定桨距风力发电机组，发电机的功率根据叶片的气动性能随风速的变化而变化。当功率超过额定功率时，

变桨距机构开始工作，调整叶片桨距角，将发电机的输出功率限制在额定值附近。

2) 发电。随着并网型风力发电机组容量的增大，大型风力发电机组的单个叶片已重达数吨，操纵如此巨大的惯性体，并且响应速度要能跟上风速的变化是相当困难的。近年来设计的变桨距风力发电机组，除对桨叶进行桨距控制以外，还通过控制发电机转子电流来控制发电机转差率，使得发电机转速在一定范围内能够快速响应风速的变化，以吸收瞬变的风能，使输出的功率曲线更加平稳。

这种控制方式的风力发电机组多采用双馈发电机，双馈异步发电机在定、转子上均布有三相绕组，运行时，定子侧直接接入三相工频电网，而转子侧通过变频器接入所需低频电流。变流器有 AC—AC 变流器、AC—DC—AC 变流器和正弦波脉宽调制双向变流器三种。无论定子侧还是转子侧都有能量馈送，见图 1-17。

设系统工作时转子转速为 n ，转子绕组通过变频器提供的励磁电流在转子绕组上产生的旋转磁场相对于转子的转速为 n_2 。当发电机的转速随着风速的变化而变化时，主要利用变频器调节输入转子的励磁电流频率来改变转子磁场的旋转速度 n_1 。

- ① 当转子转速低于同步转速时， $n_1 = n + n_2$ 。
- ② 当转子转速高于同步转速时， $n_1 = n - n_2$ 。
- ③ 当转子转速等于同步转速时， $n_2 = 0$ ，相当于直流励磁。

双馈发电机励磁可调节励磁电流的频率、幅值和相位。可通过转子侧的变频器来调节励磁电流的频率，保证在变速运行情况下发出恒频的交流电。也可通过改变励磁电流的幅值和相位，调节输出的有功功率和无功功率，其原理见图 1-18。当转子电流相位改变时，由转子电流产生的转子磁场位置会有一个空间位移，使得双馈发电机定子感应电动势矢量对于电网电压矢量的位置也发生变化，即功率角发生改变，使有功功率和无功功率得到调节。

电网侧变换器的控制目标是维持两个变流器之间的直流电容端电压的恒定；转子侧变换器控制目标是发电机定子端输出的有功功率能跟踪其参考值变化，并保持功率因数不变。

双馈发电机分为有电刷和无电刷两种，有电刷双馈发电机就是传统绕线式发电机，变流

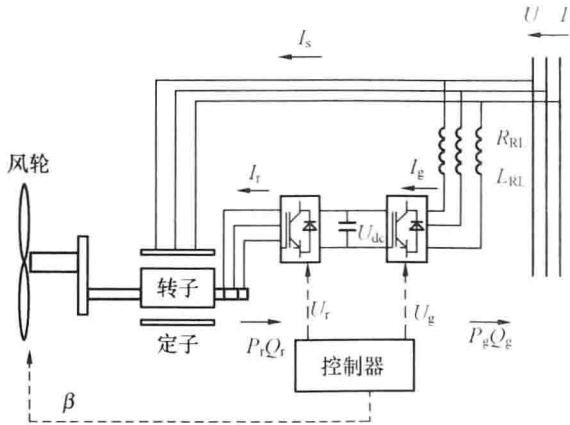


图 1-17 变速恒频双馈风力发电机组控制原理图

器通过滑环、电刷对定子进行馈电。但由于绕线式异步发电机有滑环、电刷存在,这种摩擦接触式结构不适合运行环境比较恶劣的风力发电装置。

无刷双馈发电机由 2 台绕线式异步发电机组成,其原理见图 1-19,两转子的同轴连接省去了滑环和电刷。无刷双馈发电机可在转子转速变化的条件下,通过控制励磁机的励磁电流频率来确保发电机输出电频率保持 50Hz 不变。因此,无刷双馈发电机可实现变速恒频发电。无刷双馈发电机结构简单,坚固可靠,比较适合风力发电等运行环境比较恶劣的发电系统使用。若无刷双馈发电机运行在中速区和高速区,励磁机经变频器向电网输出能量。要利用这部分能量,变频器的整流应该是可控的。

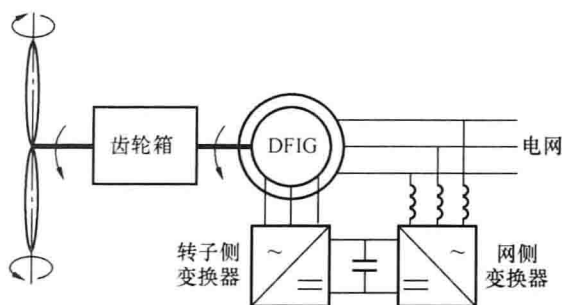


图 1-18 双馈发电机原理

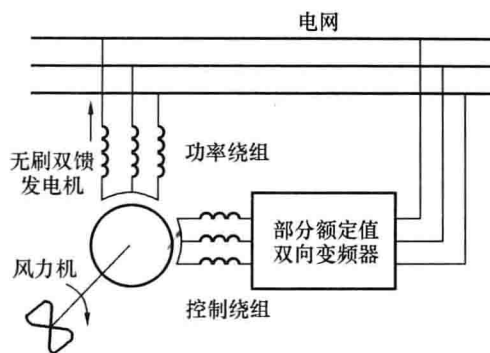


图 1-19 无刷双馈发电机原理

3) 偏航。双馈风力发电机组的偏航系统工作时分手动偏航、自动偏航和偏航解缆三种模式。

手动偏航是三种偏航方式中优先级最高的,主要用在调试过程和故障处理过程的偏航。通过显示屏上的组合按键可以顺时针和逆时针偏航。手动偏航可以通过按键停止或在转过 180° 后自动停止。

自动对风偏航与风向、风速有关。对 FD 型风机来说,安装有两个偏航方向记数传感器,当风向在 1min 内偏离 8° 或在 2min 内偏离 16° 时才会松开偏航刹车,延时 0.2s,启动偏航电动机,执行自动对风偏航。在达到设定的偏航停止角度 -2° 时,延时 0.5s,制动偏航刹车,停止偏航电动机。

当电缆扭曲圈数达到 2 圈且风速低于 3m/s,或电缆扭曲圈数达到 3 圈时,表示风机向一个风向,要自动偏航解缆;风机安装有扭缆开关,该开关直接连接到安全链,当电缆扭曲的圈数达到 4 圈时,说明自动解缆失败,要触发安全链紧急停机。

(3) 双馈风力发电机组的优缺点。

1) 双馈风力发电机组的优点。允许发电机在同步转速上下 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。

2) 双馈风力发电机组的缺点。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提高,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机电机系统产生噪声的一个重要声源,低负荷运行时效率低。发电机转子绕组带有集电环、电刷,增加维护工作量和故障率。控制系统复杂。