

FENGLI FADIAN JIZU  
YUANLI YU YINGYONG

# 风力发电机组

## 原理与应用

薛迎成 彭思敏 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

FENGLI FADIAN JIZU  
YUANLI YU YINGYONG

# 风力发电机组

## 原理与应用

薛迎成 彭思敏 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

在化石能源即将枯竭和环境污染日益严重的今天，风能凭借其资源丰富、容易开发和性价比高的优势，越来越引起人们的关注。本书主要介绍了作为风力发电系统主要组成部分的风力机、发电机的性能和特性，另外在运行控制、功率平滑控制、电控系统、监控系统和低电压穿越方面也做了介绍，最后描述了风力发电机原理实验。

本书可作为高等学校新能源、风电、电气自动化专业的教材，也可作为风电相关领域工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

风力发电机组原理与应用/薛迎成, 彭思敏编著. —北京: 中国电力出版社, 2018. 6  
ISBN 978-7-5198-1899-9

I. ①风… II. ①薛… ②彭… III. ①风力发电机-发电机组 IV. ①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 067026 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: 王杏芸 (010-63412394)

责任校对: 郝军燕

装帧设计: 郝晓燕

责任印制: 杨晓东

---

印 刷: 三河市百盛印装有限公司

版 次: 2018 年 6 月第一版

印 次: 2018 年 6 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 11.25

字 数: 272 千字

印 数: 0001—2000 册

定 价: 36.00 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

随着大规模风力发电不断接入电网，给电网带来了系统调频、调峰、风电功率预测、低电压穿越等诸多运行控制问题，因此，应加强风电对电网影响的相关技术研究。本文试图从变速风电机组（VSWT）、输出功率平滑、电网故障穿越技术三方面来研究这个问题。本书立足于风力发电系统的基本原理，着重介绍了系统控制以及面向工程应用的关键技术。主要内容包括十二章。

第一章为概述，介绍风力发电的意义、研究现状及研究内容。第二~八章针对风电系统原理和控制技术展开，分别从风力机组空气动力学、风电机组特性、风力机的分类与结构、风力机组模型、风力机组电控系统、风电场监控系统这六个方面进行了介绍，其中包括了风电的基本原理，也有当前最新的一些研究进展。另外在运行控制、功率平滑控制、电控系统、监控系统和低电压穿越方面也做了介绍，最后描述了风力发电机原理实验。

本书的特点如下：

(1) 全面系统。风力发电技术涉及气象、气动、结构、材料、力学、电学、电力电子、控制、接网以及规划等多个学科领域。

(2) 图表并茂，运用恰当。本书图表结合，配合正文，使读者更易于理解、易于掌握。

(3) 附录介绍了新开发的风力发电机原理实验，实验项目包括双馈风力发电系统亚同步离网实验、双馈风力发电系统超同步离网实验、垂直轴风力发电离网实验、室外风光互补实验、风机蓄电池充电实验。

本书章节相对独立，不仅可用作高校能源与动力专业的教材，而且也可作为风电工程师们的指导手册。本书第一~十章由薛迎成编写，附录部分由彭思敏编写，由于作者水平有限，不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

本书由盐城工学院教材出版基金资助出版。

## 目 录

前言	
第一章 概述	1
第一节 风力发电意义	1
第二节 风力发电技术的研究现状	2
第三节 风电发展的展望	3
第四节 风电发展面临的问题	4
第五节 风电与环境保护	5
第二章 风电机组的分类与结构	7
第一节 风电机组的分类	7
第二节 风电机组的基本原理和构成	14
第三章 风力机组空气动力学	28
第一节 概述	28
第二节 叶片的空气动力特性	34
第三节 非理想稳态空气动力学问题	37
第四节 利用风轮的空气动力特性进行功率调节	38
第四章 风电机组模型	42
第一节 风电技术	42
第二节 风电机组的运行机理	45
第三节 风力机与传动模型	47
第四节 恒速恒频风力发电机数学模型	50
第五节 变速恒频双馈风电机组数学模型	51
第六节 直驱永磁同步风电机组模型	54
第五章 风电机组的运行控制	63
第一节 风常规运行过程	63
第二节 风电机组工作状态及其转换	66
第三节 变桨距风电机组的启动	72
第四节 定桨恒速风电机组的制动与保护系统	75
第六章 主传动、齿轮箱与联轴器	78
第一节 主传动	78

第二节	齿轮箱 .....	81
第三节	联轴器 .....	82
<b>第七章</b>	<b>风电机组电控系统 .....</b>	<b>83</b>
第一节	风电机组控制系统概述 .....	83
第二节	2MW 风电机电控系统 .....	85
第三节	HQ-810 风电机组电控系统 .....	93
<b>第八章</b>	<b>风电场监控系统 .....</b>	<b>104</b>
第一节	风电场监控的主要功能要求 .....	104
第二节	1.5MW 双馈式风电机组监控系统实例 .....	115
<b>第九章</b>	<b>常规机组和风电机组频率特性比较 .....</b>	<b>126</b>
第一节	不同风电机组的频率响应特性分析 .....	126
第二节	不同风电机组的频率响应特性仿真分析 .....	128
第三节	常规机组和风电机组频率特性比较 .....	130
第四节	变速风电机组短期有功功率支持能力 .....	132
<b>第十章</b>	<b>基于功率滤波的风电场功率平滑控制 .....</b>	<b>134</b>
第一节	风电功率波动特性分析 .....	134
第二节	风电机组扩展桨距控制原理 .....	137
第三节	基于功率滤波的风电场功率平滑控制 .....	139
<b>附录 A</b>	<b>双馈风电系统亚同步离网实验 .....</b>	<b>146</b>
A1	双馈风电系统实验装置简介 .....	146
A2	亚同步离网实验 .....	148
<b>附录 B</b>	<b>双馈风电系统超同步离网实验 .....</b>	<b>150</b>
<b>附录 C</b>	<b>垂直轴风电离网实验 .....</b>	<b>152</b>
C1	垂直轴风电实验平台使用要求及操作流程 .....	152
C2	垂直轴风电离网实验 .....	153
<b>附录 D</b>	<b>室外风光互补实验 .....</b>	<b>158</b>
D1	风光互补控制实验平台系统 .....	158
D2	风电机组 VI 特性曲线实验 .....	164
<b>附录 E</b>	<b>风机蓄电池充电实验 .....</b>	<b>168</b>
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>172</b>

## 第一章 概 述

### 第一节 风力发电意义

#### 一、能源与环境危机

能源危机和环境问题是人类所面临的两大难题。为了解决这两大矛盾，实现可持续发展战略，开发可再生、清洁无污染的新能源得到了空前的重视。坚决贯彻科学发展观，走可持续发展道路，利用先进科技手段开发可再生能源，已成为中国探索和应对这两大危机的积极举措。相对于常规不可再生能源，新型可再生能源包括太阳能、风能、地热能、潮汐能和生物能等。其中，风能作为一种取之不尽、用之不竭的能源，清洁无污染，是可再生能源中最廉价、最具开发潜力的“绿色能源”。风能越来越受到世界各国的重视，并得到了广泛地开发和利用。

风能是一种清洁无污染的可再生能源。太阳辐射对地球表面的不均匀性加热是风的主要成因。空气从高压区向低压区流动就产生了风。地球自转、公转的影响和地形、地貌的差异，加剧了空气流量和流向的变化，造成风速和风向的变化。地球上大约有 2% 的太阳能被转化成风能。风力发电作为一种新的、安全可靠的洁净能源，其优越性为越来越多的人所认识。风力发电的优越性可归纳为五点。

(1) 风力发电是一种洁净的自然能源。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。风电没有常规能源及核电对环境造成的污染问题。核电的放射性废料仍是一个较难解决的问题。

(2) 风力发电技术不断进步，单机容量逐步增大，产品质量得到改善，可用率达到 98% 以上，是一种安全可靠的能源开发技术。

(3) 由于技术进步和产品生产规模增加，风力发电的经济性日益提高，风电成本持续下降。

风力发电的成本已接近煤电，低于水电和核电。若考虑煤电的环境污染和交通安全等问题，风电的经济性优于煤电。

(4) 风力发电场建设周期短。单台风力发电机组安装仅需几个星期，可多台同时安装，互不干扰。建设一个风力发电场，从土建、安装到投产，只需半年至一年时间；而煤电、核电的建设需要 2~10 年。

(5) 风力发电占地面积少。塔筒与监控、变电建筑仅占风电场约 1% 的土地，其余 99%





的土地可供农、林、牧使用。

由此可见,风力发电具有较好的经济效益和社会效益,风力发电技术的发展受到世界各国政府的高度重视。自从20世纪80年代现代并网风力发电机组问世以来,随着桨叶空气动力学、计算机技术、控制技术、发电机技术和新材料的发展,风力发电技术的发展极为迅速:单机容量从最初的数十千瓦级发展到兆瓦级;功率控制方式从定桨距失速控制向全桨叶变距和变速控制发展;运行可靠性从20世纪80年代初的50%提高到98%以上;在风电场运行的风力发电机组全部可以实现集中控制和远程控制;风电场发展空间已从内陆移到海上。

## 二、国外风力发电发展

自20世纪90年代中后期以来,风力发电技术发展良好,世界风电装机容量年平均增长率超过30%,一直保持着世界增长最快能源的地位。

风电的增长驱动因素主要包括以下四点:一是风电设备成本降低、效率提高;二是中国、日本和印度等国不断改善政策,支持风电发展;三是由于石油和天然气成本高昂导致人们对能源安全问题越来越担心;四是风能利用有助于减少二氧化碳的排放量,尤其是用风电代替燃煤发电。

## 三、国内风力发电发展概述

我国具有丰富的风能资源,根据最新的风能资源评估,我国陆地可利用风能资源约 $3 \times 10^8 \text{ kW}$ ,加上近岸海域可利用风能资源,共计约 $1 \times 10^9 \text{ kW}$ 。主要分布在两大风带:一是“三北地区”(东北、华北北部和西北地区);二是东部沿海陆地、岛屿及近岸海域。另外,内陆地区还有一些局部风能资源丰富区。特别是在我国的西北、华北和东北以及东部沿海地区,每年风速在 $3 \text{ m/s}$ 以上的时间近4000h,一些地区的年平均风速可达 $6 \sim 7 \text{ m/s}$ ,具有极高的开发利用价值。

目前,中国正大力投资在甘肃、新疆、河北、蒙东、蒙西、吉林和江苏沿海建设七大“千万千瓦级”风电基地。2010年6月,中国第一座千万千瓦级风电基地在甘肃酒泉正式竣工并投入运营,年上网达 $8.58 \times 10^8 \text{ kW}$ ,可节约标准煤 $3 \times 10^9 \text{ t/a}$ ,减少 $\text{CO}_2$ 排放量 $8.1 \times 10^9 \text{ t/a}$ ;2010年7月,亚洲首座大型海上风电场——上海东海大桥海上风电场竣工投产,成为至今欧洲之外的第一个大型海上风电场。2010年1月6日由华锐风电负责建设的“国家能源海上风电技术装备研发中心”正式获得国家能源局授牌。国内功率最大的6MW样机也已于2011年6月正式出产下线。

## 第二节 风力发电技术的研究现状

风力发电是利用风能来发电,风力发电包含两个能量转换过程,即风能和机械能之间的转换以及机械能和电能之间的转换。因此,整个风力发电系统包括两大核心部分,一部分是把风能转化成机械能的风力机,另一部分是把机械能转化成电能的发电机。

风力机的发展经历了从多种结构形式向少数几种结构形式的过渡过程。目前,风力机主要以水平轴、上风向、三叶片的机组为主,其常见的功率控制方式有以下几种。

### 1. 定桨距失速调节型风力发电机组

定桨距是指桨叶与轮毂的连接是固定的,桨距角固定不变,即当风速变化时,桨叶的迎





风角度不能随之变化。

### 2. 变桨距调节型风力发电机组

变桨距调节型风力发电机组是在定桨距风电机的基础上增加桨距调节装置，可以根据风速变化来改变叶片攻角来进行功率调节，而不再完全依赖于叶片的气动特性。

### 3. 主动失速调节型风力发电机组

主动失速调节型风力发电机组将定桨距失速调节型与变桨距调节型两种风力发电机组相结合，充分吸取了被动失速和桨距调节的优点，桨叶采用失速特性，调节系统采用变桨距调节。

风力发电机及其控制系统是风力发电系统的另一大核心部分，它负责将机械能转换为电能。根据发电机的运行特征和控制技术，风力发电技术可分为恒速恒频（Constant Speed Constant Frequency, CSCF）风力发电技术和变速恒频（Variable Speed Constant Frequency, VSCF）风力发电技术。

## 第三节 风电发展的展望

至 2030 年我国风电累计装机预计可以达到  $1.2 \times 10^8 \text{kW}$ ；若 2020 年后每年新增风电装机超过  $1.1 \times 10^7 \text{kW}$ ，约占全国每年新增发电装机的 30%，即达到欧盟过去五年中新增风电装机占新增发电装机的比例；至 2030 年我国累计风电装机可以达到  $1.8 \times 10^8 \text{kW}$  左右，此时，风电在全国电力容量中的比重超过 11%，可以满足全国 5.7% 的电力需求。2030 年以后水能资源大部分也将开发完全，风电则以其良好的社会和环境效益，日渐成熟的技术，逐步降低的发电成本，成为我国电力建设的重要部分。风电若以每年新增  $1.5 \times 10^7 \text{kW}$  的速度发展，年均增长速度为 5%~7%（GWEC 预测全球平均年增长为 2% 左右），我国在 2050 年的风电装机可以达到  $4 \times 10^8 \sim 5 \times 10^8 \text{kW}$ ，届时风电将成为继火电、水电之后的第三大发电电源。

经分析，我国的风电市场发展有着较好的发展前景。按照单位千瓦投资 8000 元计算，到 2020 年左右，我国的风电可以形成每年 500 亿~600 亿元的投资市场，潜力是巨大的。

虽然海上风电项目仅占全球风电装机容量的 2% 多一点，但是 2013 年年安装量达到第七的成绩表明海上风电项目正在快速发展。7100MW 的海上风电超过半数以上是英国开发的，2013 年英国就在该国水域内形成了 730MW 的风电规模，而丹麦、德国和比利时则分别新增了至少 190MW 进而处于风电开发的第二阵营，而中国则只新增了 39MW 的海上风电开发规模，越南和西班牙都是首次开展海上风电项目，美国则以一个非常小的位于缅因州海岸附近的项目开始海上风电的探索。

海上风电开发仍是比较昂贵的发电技术之一，但内陆的风电却往往比火电、天然气发电以及核电在风力资源丰富的地区有很强的竞争能力。如今的风电成本在持续下降，因为风电开发商正在通过稳步提高涡轮效率而不断地提升单位机器利用风能的效率。在美国，风电的平均价格自 2009 年以来已经下降了 40%。

2008 年，来自中国工程院和国家发展改革委能源研究所的专家们做出预测，在低增长、中度增长和高增长的三种情景中，中国的风电装机容量将在 2020 年分别达到  $1 \times 10^8 \text{kW}$ ， $1.5 \times 10^8 \text{kW}$  和  $2 \times 10^8 \text{kW}$  的规模。与此同时，风电在总能源消费中的比重将分别达到 1.6%，



2.5%和3.3%。如果风电在总能源消费中的比重要达到5%，那么其装机容量就需要达到 $3 \times 10^8$  kW。

根据“保守方案”的预测，风电将在2020年达到 $1.5 \times 10^8$  kW，2030年达到 $2.5 \times 10^8$  kW，到2050年达到 $4.5 \times 10^8$  kW。而根据“乐观方案”预测，电网接入瓶颈等问题得到初步解决，这组数字将分别增加到2020年的 $2 \times 10^8$  kW、2030年的 $3 \times 10^8$  kW和2050年的 $5 \times 10^8$  kW。最后，“积极方案”的情景分析假定在巨大的温室气体减排压力下，政府将会引入强有力的政策激励支持风电发展，到2050年，风电技术可开发的资源将会基本得到开发。这一版本的情景分析表明，风电发展将在2020年达到 $2.3 \times 10^8$  kW，2030年达到 $3.8 \times 10^8$  kW，到2050年达到 $6.8 \times 10^8$  kW。按照这一预测，风电在三个阶段总能源消费中的比重将分别达到2.2%、2.9%和3.3%，二氧化碳减排量分别达 $2.6 \times 10^8$  t、 $3.7 \times 10^8$  t和 $4.1 \times 10^8$  t。这些预测更加接近全球风能理事会所做展望中的“超前情景”分析。该情景分析预计中国的风电装机容量将会在2015年达到 $1.3 \times 10^8$  kW，2020年达到 $2.5 \times 10^8$  kW，2030年超过 $5 \times 10^8$  kW。风电将在2020年占全国总电力供应的10%，到2030年达到16.7%。

#### 第四节 风电发展面临的问题

随着风电场规模的扩大，风电装机在电网中所占比例越来越高，其对电网的影响范围也从局部逐渐扩大，大规模风电并网对电网安全运行影响日益显现。风电的随机性及间歇性等特性，对系统的运行造成了较大冲击，其对电网的影响已从简单的电压波动和谐波污染等局部电能质量问题扩展至整个系统的潮流分布、线路传输功率与整个系统的惯量、暂态稳定性及频率稳定性、调频调峰及经济调度等诸多方面。

(1) 稳定性问题。风电大容量远距离输送系统输送距离长，输送功率大，存在电压稳定性问题。规划在河北、内蒙古、江苏、甘肃、新疆等地建设的“千万千瓦级”风电基地大都处于电网末端，电网网架结构不够坚强、电源结构较为单一，风电大规模接入对这些地区电网稳定运行带来很大压力。

(2) 风电并网率低下问题。2010年我国风电并网比例仅为74%，明显低于欧美国家90%以上的并网比例；风电机组的并网比例逐年呈下降的趋势。中国风电装机容量快速增长的背后是风电资源的严重浪费，未并网风电装机容量持续增长，弃风现象严重并在短时间内难以解决。

造成风电并网率低下的原因一方面是缺乏风电消纳方案，与风电并网相关的发电项目输送线路、网架结构电网建设相对滞后；另一方面，过度集中的风电分布使得电网难以消纳。为提高风电外送能力，改善风电并网电能质量，必须积极采用先进技术，如动态无功补偿设备(SVC、STATCOM等)、串补/可控串补、可控高抗、自动电压控制(AVC)等。动态无功补偿设备用于提高风电场无功补偿及电压调节能力，改善电能质量；串补/可控串补用于缩短输电系统电气距离，提高安全稳定水平；可控高抗用于稳态调节系统电压，使风电外送通道在有功功率波动时保持电压水平。

(3) 调峰问题。调峰问题也是制约我国风电大规模并网的主要矛盾之一。电源结构不合理是导致调峰困难的根本原因。我国火电占总装机容量的75.9%，水电只占21.6%。火电比



重大，供热机组较多，快速调节机组少且运行制约因素多。

(4) 发电计划与调度问题。传统的发电调度计划是基于电源的可靠性以及负荷的可预测性为基础的，但是，由于此系统内含有风电场并且风电场出力的预测水平不能达到工程实用性要求，制订发电计划变得尤为困难。风力发电并网以后，如果电力系统的运行方式不相应地做出调整和优化，系统的动态响应能力将不足以跟踪风电功率的大幅度、高频率的波动，系统的电能质量和动态稳定性将受到显著影响，这些因素反过来会限制系统准入的风电功率水平。

## 第五节 风电与环境保护

可再生能源是清洁无污染、可再生的能源，而风电又是可再生能源中最具竞争力、最有发展前途的能源开发方式。任何事物都具备两面性，风电在能够产生巨大环境效益的同时，也可能对环境产生一些负面影响。这些影响主要表现在噪声、视觉影响、候鸟迁徙、电磁辐射等。但与其他常规发电方式相比，风电在上述方面的影响是很小的，或是可以避免的。总体看来，风电发展利大于弊。综合分析，风电对环境保护的作用体现在下述几点。

### 一、风电与减排温室气体

根据联合国气候变化政府间委员会发布的气候变化评估报告，有超过 90% 的可能性，人类活动是过去半个世纪气候变暖的主因。气候变化的罪魁祸首就是人类燃烧化石能源释放的以二氧化碳为代表的温室气体，风能作为一种可再生能源，能够在提供能源的同时，减少二氧化碳的排放。

### 二、风电的环境效益

使用风电还可以减少使用传统能源，例如燃煤等带来的区域性环境问题。国家环境保护部的年度环境发展报告指出，因燃煤造成的二氧化硫和烟尘排放量约占我国排放总量的 70%~80%，二氧化硫排放形成的酸雨面积已占国土面积的 1/3。环境污染给我国社会经济发展和人民健康带来了严重影响。

### 三、风电与旅游业

我国的风资源多分布在远离城市的边远地区或沿海地区。风电场附近人口密度低，风电场多选择在土壤贫瘠的丘陵地带。即使是在草场和沿海地区，建设风电场的地方还照样可以放牧、养殖水产。人们把洁白的风电机组看作一道美化环境的风景线，将其与清洁的环境和可持续发展的未来相联系，我国许多风电场已经成为吸引游客的旅游景点。

### 四、风电产生的环境效应

#### 1. 风电场的噪声影响

风电场的噪声主要来自两个方面，风电机组的机械噪声和气流噪声。机械噪声主要是发电机、齿轮箱工作和叶片切割空气产生的；而气流噪声是经过叶片的气流和叶轮产生的尾流形成的。风电机组的噪声有些是规则的，有些是不规则的。随着制造技术水平的提高，风电机组噪声的强度也在不断下降。与其他日常生活中的环境噪声，如交通、建筑和工业噪声相比，风电机组所产生的噪声要小得多。并且风电场在建设时，一般都选在远离村镇的地方，不会对居民的生活产生影响。



## 2. 风电场的视觉影响

风电场的视觉影响能否作为环境影响评价的因素尚无定论，只有在英国和意大利等少数国家，有某些个人和团体对风电的视觉影响提出质疑。大多数国家，例如丹麦、德国、美国 and 西班牙等，都没有提出风电场视觉污染的问题。任何事物都是相对的，风电场的视觉影响无论如何都要比火电厂、核电厂小得多，且不谈其他方面的环境污染。

## 3. 风电场对鸟类的影响

风电场的建设可能会对鸟类的生活和繁殖带来影响，旋转的叶片还有可能被冲撞飞行经过的鸟类，造成鸟类的死伤。我国要求所有建设项目都要进行环境影响评价，风电场的建设也不例外。所有风电场在建设前的环境影响评价中都要包括对鸟类，尤其是对候鸟迁徙的影响，看其选址是否在候鸟迁徙的路线上。如果是，就要求选址时避开候鸟迁徙的路线。其他鸟类有可能在飞行时撞上转动中的叶片而死亡，但这种情况在已建成的风电场中很少出现。当地的鸟类比较熟悉情况，发现在它们生活的地方有新建的风电机组，会主动避开。

随着风电机组技术的进步，同等额定功率的叶轮转动的速度有所下降，对鸟类的伤害程度也相应有所降低。美国的一项研究表明，由于风电机组运转造成的鸟类的伤害占各种鸟类伤害事件的0.01%~0.02%。

## 4. 风电场的电磁辐射

电磁辐射是电器设备运行时产生的工频辐射。风电场的辐射主要来自发电机、电动机、变电所和输电线路。发电机、电动机的辐射一般比较小。变电站和输电线路在100kV以上的属电磁辐射项目，而现在一般的风电场的变电站和输电线路都在100kV以下，所以电磁辐射强度不大。同时，现代化的风机设计都对电磁辐射做出了严格的限制标准，风电场电磁辐射的影响将越来越小。

## 5. 近海风电场的环境影响

我国还没有大规模投入商业化运行的近海风电场，但相应的试点示范准备工作正在进行当中。目前世界上的近海风电场主要集中在欧洲。近海风电场的建设可能会带来两个方面的影响，一个是电磁干扰，一个是噪声。输电电缆形成的电磁场可能会对海洋生物带来影响。因此近海风电场多采用多导电缆系统以防止产生强磁场。对于噪声，现有研究表明，风电机组运行时产生的噪声与渔船和风浪产生的噪声强度相近，不会对海洋生物造成很大影响。实践中发现，丹麦北海风电场周边生活的鳗鱼和仓鸮非常喜欢在风电机组的基座周围活动，仓鸮甚至还在基座上产卵喂食。总之，风电对环境的负面影响并不像一些人所描述的那么大。而风电发展在改善能源结构，减少环境污染，降低温室气体排放，减缓气候变化方面的贡献却是巨大的。如果人类不使用清洁的可再生能源，而一味使用传统的化石能源，地球上的资源终将耗尽，而化石能源的使用所带来的环境污染、气候变化也最终会给人类的自身生存环境造成不可逆转的破坏。

## 第二章 风电机组的分类与结构

### 第一节 风电机组的分类

#### 一、按照风轮形式分类

##### 1. 垂直轴风电机组

垂直轴风轮按形成转矩的机理分为阻力型和升力型。阻力型的气动效率远小于升力型，故当今大型并网型垂直轴风力机的风轮全部为升力型。

阻力型的风轮转矩是由两边物体阻力不同形成的，其典型代表是风杯，大型风电机不用。

升力型的风轮转矩由叶片的升力提供，是垂直轴风电机组的主流，尤其是风轮像打蛋形的最流行，当这种风轮叶片的主导载荷是离心力时，叶片只有轴向力而没有弯矩，叶片结构最轻。

特点如下。

(1) 安全性。采用了垂直叶片和三角形双支点设计，并且主要受力点集中于轮毂，因此叶片脱落、断裂和叶片飞出等问题得到了较好的解决。

(2) 噪声。采用了水平面旋转以及叶片应用飞机机翼原理设计，使得噪声降低到在自然环境下测量不到的程度。

(3) 抗风能力。水平旋转和三角形双支点设计原理，使得它受风压力小，可以抵抗 $45\text{m/s}$ 的超强台风。

(4) 回转半径。由于其设计结构和运转原理的不同，比其他形式风电具有更小的回转半径，节省了空间，同时提高了效率。

(5) 发电曲线特性。启动风速低于其他形式的风电机，发电功率的上升幅度较平缓，因此在 $5\sim 8\text{m/s}$ 风速范围内，它的发电量较其他类型的风电机高 $10\%\sim 30\%$ 。

(6) 利用风速范围。采用了特殊的控制原理，使它的适合运行风速范围扩大到 $2.5\sim 25\text{m/s}$ ，在最大限度利用风力资源的同时获得了更大的发电总量，提高了风电设备使用的经济性。

(7) 刹车装置。可配置机械手动和电子自动刹车两种，在无台风和超强阵风的地区，仅需设置手动刹车即可。

(8) 运行维护。采用直驱式永磁发电机，无须齿轮箱和转向机构，定期（一般每半年）



对运转部件的连接情况进行检查即可。

## 2. 水平轴风电机组

水平轴（风轮）风电机组，是指风轮轴线基本与地面平行安置在垂直地面的塔架上，是当前使用最广泛的机型。

水平轴风电机组还可分为上风向及下风向两种机型，上风向机组其风轮面对风向，安置在塔架前方。上风向机组需要主动调向机构以保证风轮能随时对准风向。下风向机组其风轮背对风向安置在塔架后方。当前大型并网风电机组几乎都是水平轴上风向型。

水平轴上风向三叶片风电机组是当代大型风电机组的主流，两叶片的产品也比较多见。

两叶片风电机组在风轮直径（扫掠面积）与三叶片风电机组相同的情况下，其转速更快才能产出相同的功率。要求叶片的寿命（循环次数）比三叶片机型的高。由于转速快叶尖速度高，风轮的噪声水平也高，因此对周围的环境影响也较大。两个叶片相对三叶片的质量平衡及气动力平衡都比较困难，因此功率和载荷波动较大。其优点是叶片少，成本相对低，对于噪声要求不高的离岸型风电机组，两叶片是比较合适的。

## 二、按照有无齿轮箱分类

变速变桨风电机组的风能转换效率更高，能够有效降低风电机组的运行噪声，具有更好的电能质量，通过主动控制等技术能够大幅度降低风电机组的载荷，使得风电机组功率重量比提高，这些因素都促成了变速变桨技术成为当今风电机组的主流技术。

目前，市场上主流的变速变桨恒频型风电机组技术分为双馈式和直驱式两大类。双馈式变桨变速恒频技术的主要特点是采用了风轮可变速变桨运行，传动系统采用齿轮箱增速和双馈异步发电机并网；而直驱式变速变桨恒频技术采用了风轮与发电机直接耦合的传动方式，发电机多采用多极同步电机，通过全功率变频装置并网。直驱技术的最大特点是可靠性和效率都进一步得到了提高。

还有一种介于二者之间的半直驱式，由叶轮通过单级增速装置驱动多极同步发电机，是直驱式和传统型风电机组的混合。

### 1. 直驱式风电机组

直驱式风电机组，是一种由风力直接驱动发电机，亦称无齿轮风电机，这种发电机组采用多极电机与叶轮直接连接进行驱动的方式，免去齿轮箱这一传统部件。由于齿轮箱是目前在兆瓦级风电机中属易过载和过早损坏率较高的部件，所以，没有齿轮箱的直驱式风电机，具备低风速时高效率、低噪声、高寿命、减小机组体积、降低运行维护成本等诸多优点。

直驱式变速恒频（DDVSCF）风电系统框图如图 2-1 所示，风轮与同步发电机直接连接，无须升速齿轮箱。首先将风能转化为频率、幅值均变化的三相交流电，经过整流之后变为直流，然后通过逆变器变换为恒幅、恒频的三相交流电并入电网。通过中间电力电子变流器环节，对系统有功功率和无功功率进行控制，实现最大功率跟踪，最大效率利用风能。

与双馈式风电系统相比，直驱式风电系统的优点在于：传动系统部件的减少，提高了风电机组的可靠性和利用率；变速恒频技术的采用提高了风电机组的效率；机械传动部件的减少降低了风电机组的噪声、提高了整机效率；可靠性的提高降低了风电机组的运行维护成本；部件数量的减少，使整机的生产周期大大缩短；利用现代电力电子技术可以实现对电网



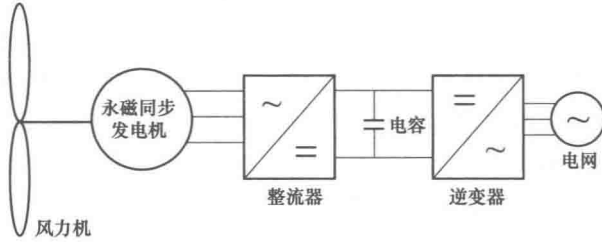


图 2-1 直驱式变速恒频风电系统框图

有功功率和无功功率的灵活控制；发电机与电网之间采用全功率变流器，使发电机与电网之间的相互影响减少，电网故障时对发电机的损害较小。其缺点在于：由于功率变换器和发电机组与电网全功率连接，功率变换器造价昂贵，控制复杂；用于直接驱动发电的发电机工作在低转速、高转矩状态，导致发电机设计困难、极数多、体积大、造价高、运输困难。

直驱式风电系统（Direct Drive Wind Energy Generation System, DDWECS）的发电机主要有两种类型：转子电励磁的集中绕组同步发电机以及转子永磁材料励磁的永磁同步发电机。转子电励磁式直驱风电系统由于需要给转子提供励磁电流，需要滑环和电刷，这两个部件发生故障率很高，需要定期更换，因此维护量大，相对双馈式风电机（DFWECS）来说只省去了齿轮箱设备，如图 2-2 所示。而转子永磁体励磁式直驱风电系统采用永磁材料建立转子磁场，省去了滑环和电刷等设备，无须定期维护，系统结构紧凑，整机可靠性、效率很高，如图 2-3 所示。

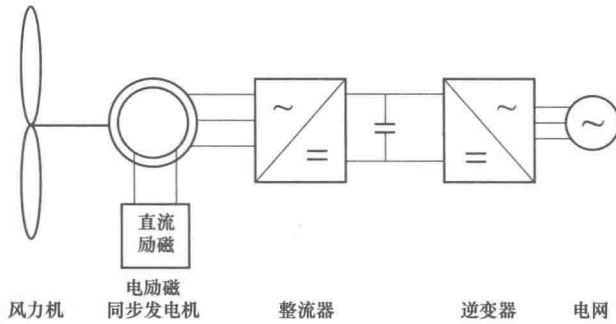


图 2-2 电励磁式直驱风电机组结构图

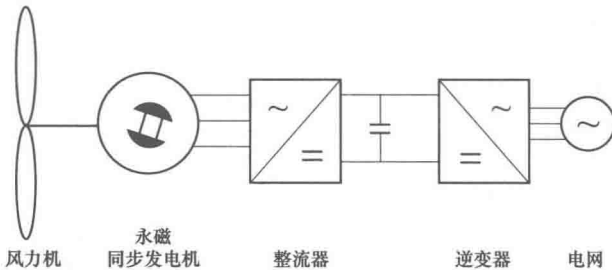


图 2-3 永磁材料励磁式直驱风电机组结构图





尽管直驱式风电系统变流器以及永磁同步发电机造价昂贵，但是由于其可靠性和能量转换效率高，维护量小，整机生产周期小等优点，特别适合于海上风电。

采用永磁同步发电机的直驱式风电系统，由于无须励磁控制，电机运行速度范围宽、电机功率密度高、体积小。随着永磁材料价格的持续下降、永磁材料性能的提高以及新的永磁材料的出现，在大、中、小功率，高可靠性，宽变速范围的发电系统中的应用越来越广泛。

有的直驱机组，将风轮与外转子合二为一，取消了轮毂，叶片直接装在转子外部。进一步简化了结构、减轻重量。

直驱式风电机组的特点如下：

- (1) 由于零件和系统的数量减少，维修工作量大大降低。
- (2) 最近开发的直驱机型多数是永磁同步发电机，不需要励磁功率，传动环节少，损失少，风能利用率高。
- (3) 运动部件少，由磨损等引起的故障率很低，可靠性高。
- (4) 采用全功率逆变器联网，并网、解列方便。
- (5) 采用全功率逆变器输出功率完全可控，如果是永磁发电机则可独立于电网运行。

缺点是由于直驱型风电机组没有齿轮箱，低速风轮直接与发电机相连接，各种有害冲击载荷也全部由发电机系统承受，对发电机要求很高。同时，为了提高发电效率，发电机的极数非常大，通常在 100 极左右，发电机的结构变得非常复杂，体积庞大，需要进行整机吊装维护。发电机尺寸大、质量大，运输、安装比较困难。

## 2. 双馈式风电机组

交流励磁发电机又称为双馈发电机组。双馈式风电机组中，为了让风轮的转速和发电机的转速相匹配，必须在风轮和发电机之间用齿轮箱来连接，这就增加了机组的总成本；而齿轮箱噪声大，故障率高，需要定期维护，并且增加了机械损耗；机组中采用的双向变频器结构和控制复杂；电刷和滑环间也存在机械磨损。

双馈式风电机组的特点是采用了多级齿轮箱驱动有刷双馈式异步发电机。它的发电机的转速高，转矩小，重量轻，体积小，变流器容量小，但齿轮箱的运行维护成本高，且存在机械运行损耗。

双馈感应发电机组是具有定子、转子两套绕组的绕组型异步发电机（DFIG），定子接入电网，转子通过电力电子变换器与电网相连，如图 2-4 所示。

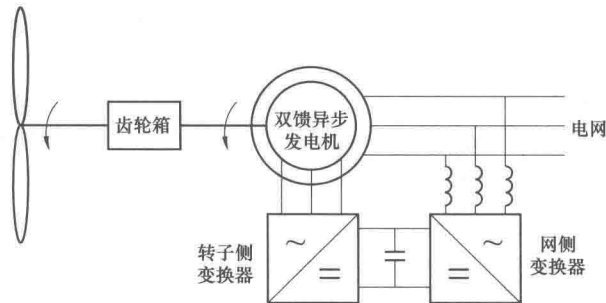


图 2-4 双馈式变速恒频风电系统框图



在风电中采用交流励磁双馈风电方案，可以获得以下优越的性能。

(1) 调节励磁电流的频率可以在不同的转速下实现恒频发电，满足用电负载和并网的要求，即变速恒频运行。这样可以从能量最大利用等角度去调节转速，提高发电机组的经济效益。

(2) 调节励磁电流的有功分量和无功分量，可以独立调节发电机的有功功率和无功功率。这样不但可以调节电网的功率因数，补偿电网的无功需求，还可以提高电力系统的静态和动态性能。

(3) 由于采用了交流励磁，发电机和电力系统构成了“柔性连接”，即可以根据电网电压、电流和发电机的转速来调节励磁电流，精确地调节发电机输出电压，使其能满足要求。

(4) 由于控制方案是在转子电路实现的，而流过转子电路的功率是由交流励磁发电机的转速运行范围所决定的转差功率，它仅仅是额定功率的一小部分，这样就大大降低了变频器的容量，减少了变频器的成本。

永磁直驱式风电机组和双馈式风电机组的特性比较见表 2-1。

表 2-1 永磁直驱式风电机组和双馈式风电机组的特性比较

机型和特性	双馈式风电机组	永磁直驱式风电机组
系统维护成本	较高（齿轮箱故障多）	低
系统价格	中	高
系统效率	较高	高
电控系统体积	中	较大
变流系统容量	全功率的 1/3	全功率变流
变流系统稳定性	中	高
电机滑环	半年换碳刷，两年换滑环	无碳刷、无滑环
电机重量	轻	重
电机种类	励磁	永磁，设计时要考虑永磁体退磁问题

综上所述可得以下结论。

(1) 双馈式风电机组具有很高的性价比，尤其适合变速恒频风电系统，因而在未来一段时间内仍然是风电行业的主流机型。

(2) 永磁直驱式风电机组可靠性高、运行维护简单；电网运行质量大大提高。在技术经济条件成熟时，永磁直驱式风电机组有望成为风电领域更受欢迎的产品。

目前，双馈式风电机组技术十分成熟，生产厂商较多，业主选择性更强，运行经验丰富，仍是风电场开发的主流机型。而直驱式风电机组技术尚未完全成熟，国内生产厂商较少，有些机型还处在设计研发阶段，并且已投入运行的机组运行时间较短，其性能、工艺质量尚需时日考验，更大兆瓦级直驱风电机组仍需在结构、材料、工艺等方面进一步研究。此外，使用性能更好的变流器才会有更好的前景。

### 三、按功率调节方式分类

#### 1. 定桨距失速型风电机组

定桨距失速型风电机组的典型代表是丹麦的 NEG MICON 公司生产的 600/700/750kW 机