

# 风力发电机组 原理与应用

姚兴佳 宋俊 等编著

第3版



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 风力发电机组原理与应用

第 3 版

姚兴佳 宋俊 等编著

机械工业出版社

本书主要介绍了大型风力发电机组原理及其应用的基本知识。全书共分为9章,包括绪论,风力机,发电系统,主传动与制动,变桨距、偏航与辅助系统,控制系统,风力发电机组的运行,支撑体系和风力发电机组的维护。

本书适于作为大、专院校教材,以及对从事风力发电机组设计、制造和使用的人员进行培训的教学用书,也可以作为风电爱好者的自学读物。

需要课件请登录机械工业出版社门户网下载,网址: <http://www.cmpbook.com>。

## 图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组原理与应用/姚兴佳等编著, —3版. —北京:  
机械工业出版社, 2015.9  
ISBN 978-7-111-51491-6

I. ①风… II. ①姚… III. ①风力发电机-机组  
IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第215107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:林春泉 责任编辑:林春泉  
版式设计:赵颖喆 责任校对:李锦莉  
责任印制:乔宇  
北京京丰印刷厂印刷  
2016年2月第3版·第1次印刷  
169mm×239mm·18.75印张·343千字  
0 001—3 000册  
标准书号:ISBN 978-7-111-51491-6  
定价:56.00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

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线:010-68326294

机工官博:[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203

金书网:[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

## 第3版序

本书第3版在原来的基础上做了较大的修改。修改的指导思想是使读者更加便于读、便于懂、便于记。具体做法如下：

### 1. 更加条理化

使全书内容的编排更具有逻辑性，便于阅读和理解。为此对第一章绪论、第二章风力机和第三章发电系统的结构进行了调整并重新编写，使全书前后呼应。

### 2. 突出重点，有所增删

突出重点机型基本原理的介绍，对次要内容适当删节（如第三章发电系统大幅度增加了各种发电系统基本原理的阐述，而将开关电器、继电器、母线与电缆等部分删除），使读者的精力花在更核心的内容上。

### 3. 处理好定性与定量的关系

作为基本原理的介绍，把一些定量描述的内容改为定性描述（如第三章发电系统中，变流器矢量控制的内容就是这样处理的）使读者更容易读懂。一般来说，定量分析在设计中才会应用，已经超出本书范围。尽管如此，在风力机的介绍中，还是保留了一些基本的定量分析，不仅是因为这些内容比较重要，也有利于读者对风力机原理的深入理解。

### 4. 增加新内容

增加了一些新内容。如第二章风力机中的第四节风力机的运行及控制，第三章发电系统中的发电系统保护电路，第七章风力发电机组的运行第四节变桨距-变速恒频机组中的过渡区域功率控制方式等。增加的一些新内容中，有些是来自于生产和科研实际，有些反映了风电技术的新发展。

此外，还增加了主要物理量符号表。

在本书第3版编写过程中，得到中国可再生能源学会风能专委会、中国动力工程学会新能源专委会、海上风力发电技术与检测国家重点实验室、沈阳华人人电科技有限公司、沈阳工业大学风能技术研究所等单位的指导和帮助，在此一并表示感谢。

目前，可再生能源产业有了更加清晰宏大的发展背景，万众创新给风能产业注入了新活力。我们愿以本书作为一块小小的奠基石，为新能源产业的高速列车铺路。

期待读者一如既往的关爱，提出宝贵的建议和批评。

编著者

2015年12月

## 第2版序

本书自出版以来，受到广大读者的欢迎。在此我们对读者和本书出版发行过程中给予我们帮助的所有朋友表示衷心的感谢。

本书第2版根据读者的意见在原有基础上做了一些增补。主要是增加一些风力发电新技术；补充了一些原来缺少的基础内容；将原来附录中的部分内容插入正文；将原来各章中有关机组维护的内容合并为一章，并做了大量增补。这样，在深度上适当加强了对风力发电机组的两大基础部件——风力机和发电机的理论分析；在广度上基本覆盖了目前风电场运行和主导市场的各种机型。对于读者全面系统地了解风力发电机组的原理和应用是有益的。

修改以后，本书适合于大学本科及技术专科学校作为教材；适合于各类风电技术培训班作为教学用书；适合于风电场和风电主机或配套企业管理人员、技术人员作为自学读物。

本书的改版由姚兴佳教授总策划，由姚兴佳教授、宋俊教授执笔。课件由马铁强、徐成荫制作。

在编著的过程中，王益全教授审阅了部分书稿，陶福长高级工程师提供一些资料，马晓岩同学做了很多文字工作，在此特表感谢。

我们一如既往地希望广大读者对本书改版后的不当之处提出更多的批评和建议，这样可以增加我们的见识，将今后的工作提高一步。

编著者

2011年3月

# 前 言

本书主要介绍了大型风力发电机组原理及其应用的基本知识。原理包括相关理论、定义、结构和工作机理；应用包括运行、监控、维护、失效分析和故障处理。

本书在内容上的特点是以能量流和信息流为线索，用结构框图表达整机和部件原理；打破了学科的局限，以“功能块”为基本单元安排全书结构；以稳态工作点的设置为出发点，讨论风力发电机组的控制方式。

为了便于广大读者阅读，在不影响内容完整性的前提下，本书回避了高深的数学推证和繁杂的设计理论，集中讨论结构原理，注重介绍如何解决风力发电机组应用中的实际问题。力求使读者全面掌握风力发电机组的工作原理和了解使用风力发电机组的方法。

本书适于作为培训教材，对从事风力发电机组设计、制造和使用的人员进行培训，也可以作为高等院校相关专业的教学参考资料。

本书主要由姚兴佳教授、宋俊教授主持编写，负责内容编排设计、部分内容的撰写和全书统稿。参加编写的还有（排名不分先后）马铁强、刘姝、邢作霞、单光坤、刘颖明、陈雷、宋筱文、孙传宗、邓英、周海滨。参加审稿的有郭庆鼎教授、龚良慈研究员、田世新教授、邓英高工。

在本书的编写过程中，得到杨树人教授的指导和帮助，钟明昉老师提供了很多宝贵资料，在此一并表示感谢。

本书涉及的学科很多，包括气象学、空气动力学、机械原理、机械零件、流体传动与控制、电机学、电力电子学、控制理论、振动理论和测试技术等。将诸多学科有机地结合起来，应用于风力发电机组的实际，并系统地进行介绍是比较困难的。更加困难的是对这些内容进行深入浅出的表述，便于读者阅读和掌握。在这方面我们做了最大的努力。同时，我们自己也感到本书在内容上还存在不足，甚至可能有一些错误。尽管如此，我们在整个成书过程中，在引用资料方面还是非常谨慎的，也做了不少勘误工作，相信细心的读者定能体会到我们的苦心。

编著者于沈阳工业大学

2015年12月

## 主要物理量符号表

- $a$ ——轴向气流诱导因子  
 $a'$ ——切向气流诱导因子  
 $A$ ——面积  
 $A_d$ ——风轮的扫掠面积  
 $c$ ——翼型几何弦长  
 $C$ ——电容  
 $C_d$ ——阻力特征系数  
 $C_F$ ——推力系数  
 $C_l$ ——升力特征系数  
 $C_m$ ——气动俯仰力矩系数  
 $C_M$ ——转矩系数  
 $C_p$ ——风能利用系数  
 $D$ ——叶片所受阻力  
 $f$ ——电动势的频率  
 $f_1$ ——定子电流的频率（同步频率），电网频率  
 $f_2$ ——转子电流的频率  
 $f_{em}$ ——电磁力  
 $F$ ——力，风轮所受的总轴向推力  
 $F_n$ ——叶片所受向轴向推力  
 $F_t$ ——叶片所受驱动力  
 $h$ ——高度  
 $H$ ——桨距  
 $i$ ——电流  
 $I$ ——定子绕组的线电流有效值  
 $I_{dc}$ ——直流电流  
 $I_N$ ——额定电流  
 $L$ ——电感，叶片所受升力  
 $M$ ——力矩，风轮输出转矩

- $M_{em}$ ——电磁力矩
- $M_m$ ——主传动系统的输出转矩
- $n$ ——发电机转子转速
- $n_1$ ——同步转速
- $N$ ——叶片数
- $p$ ——静压力, 电机绕组的极对数
- $p_w$ ——风功率密度
- $P$ ——功率, 风轮输出功率
- $P_1$ ——电机定子有功功率
- $P_2$ ——电机转子有功功率
- $P_{Cu1}$ ——定子铜耗
- $P_{Cu2}$ ——转子铜耗
- $P_e$ ——发电系统的输出功率
- $P_{em}$ ——电磁功率
- $P_{el}$ ——发电机有功功率
- $P_m$ ——主传动系统的输出功率 (电机轴上的机械功率)
- $P_N$ ——额定功率
- $Q_1$ ——电机定子无功功率
- $Q_2$ ——电机转子无功功率
- $r$ ——叶素所在半径
- $R$ ——风轮半径, 电阻, 叶片所受气动合力
- $s$ ——转差率
- $s_p$ ——临界转差率
- $t$ ——时间, 温度
- $u$ ——电压
- $U$ ——定子三相绕组上的线电压有效值
- $U_{dc}$ ——直流电压
- $U_N$ ——额定电压
- $v$ ——风速
- $v_d$ ——致动盘 (或风轮) 处的气流速度
- $v_\infty$ ——风轮上游未受扰动的气流速度
- $v_w$ ——风轮尾流远端气流速度
- $w$ ——气流相对速度
- $W$ ——能量



$z_0$ ——粗糙度长度

$\alpha$ ——攻角，风切变指数，双馈电机定、转子电压的相位差

$\alpha_{cr}$ ——临界攻角

$\beta$ ——桨距角

$\eta$ ——效率

$\eta_e$ ——发电系统的总效率

$\eta_m$ ——主传动系统的总效率

$\eta_N$ ——额定效率

$\lambda$ ——尖速比

$\lambda_r$ ——周速比

$\rho$ ——密度

$\varphi$ ——气流倾角，功率因数角

$\omega_1$ ——同步角速度

$\Omega$ ——风轮转动角速度

$\Omega_m$ ——主传动系统输出轴的角速度

# 目 录

第3版序

第2版序

前言

主要物理量符号表

第一章 绪论 .....	1
第一节 风 .....	1
一、风的形成 .....	1
二、风力等级 .....	6
三、风的测量 .....	8
四、风的数学描述 .....	11
五、风能可利用区的划分 .....	17
第二节 风力发电机组概述 .....	18
一、总体结构 .....	18
二、基本参数 .....	18
三、分类 .....	18
第三节 并网供电风力发电机组 .....	21
一、工作原理 .....	21
二、常见机型 .....	23
第二章 风力机 .....	28
第一节 叶片与轮毂 .....	28
一、叶片的外部特征 .....	28
二、翼型 .....	28
三、叶片的常用材料 .....	30
四、叶片断面结构 .....	31
五、轮毂 .....	32
六、叶片与轮毂的连接 .....	33
第二节 风轮 .....	34
一、风轮的几何定义和参数 .....	34
二、贝茨极限 .....	37
第三节 风轮的空气动力特性 .....	40
一、作用在叶素上的力 .....	40

二、旋转尾流·····	43
三、叶素-动量定理·····	44
第四节 风力机的运行及控制·····	46
一、风力机的调节特性·····	47
二、风力机的实际风能利用系数·····	48
三、叶片数的影响·····	48
四、风力机的控制目标·····	50
<b>第三章 发电系统</b> ·····	<b>52</b>
第一节 变压器·····	52
一、变压器的工作原理·····	52
二、变压器的分类及结构·····	52
第二节 变流器·····	54
一、电力电子器件·····	54
二、AC-DC 变换电路·····	59
三、DC-DC 变换电路·····	61
四、DC-AC 变换电路·····	62
五、正弦波脉宽调制技术·····	63
第三节 发电机概述·····	65
一、风力发电机分类·····	65
二、发电机基本参数·····	66
第四节 基于感应发电机的发电系统·····	68
一、感应发电机·····	68
二、并网方式·····	72
三、并网运行时无功功率补偿·····	73
第五节 基于同步发电机的发电系统·····	74
一、电励磁同步发电机·····	75
二、多极永磁发电机·····	78
三、同步发电系统变流器·····	82
四、发电系统保护电路·····	89
五、同步发电系统的软并网·····	93
第六节 基于双馈发电机的发电系统·····	93
一、双馈发电机·····	93
二、双馈发电系统变流器·····	101
三、撬杠 (Crowbar) 保护电路·····	104
四、并网和脱网·····	105
<b>第四章 主传动与制动</b> ·····	<b>108</b>

第一节 主传动 .....	108
一、主轴及主轴承 .....	108
二、齿轮箱 .....	110
三、联轴器 .....	117
第二节 制动 .....	121
一、机械制动 .....	122
二、空气动力制动 .....	127
<b>第五章 变桨距、偏航与辅助系统</b> .....	<b>129</b>
第一节 变桨距系统 .....	129
一、液压变桨距系统 .....	129
二、电动变桨距系统 .....	131
三、电-液变桨距系统 .....	135
四、变桨距系统的控制 .....	135
五、叶片载荷的采集 .....	138
第二节 偏航系统 .....	138
一、偏航系统的功能 .....	138
二、偏航系统的组成和工作原理 .....	138
三、执行机构 .....	139
四、偏航系统的控制 .....	142
第三节 液压系统 .....	145
一、液压元件 .....	146
二、定桨距机组液压系统 .....	158
三、变桨距机组液压系统 .....	160
第四节 润滑与温控 .....	162
一、润滑 .....	162
二、温度控制 .....	168
<b>第六章 控制系统</b> .....	<b>171</b>
第一节 控制系统的结构与功能 .....	171
一、控制系统的总体结构 .....	171
二、主控系统硬件 .....	172
三、控制系统的功能 .....	174
第二节 安全保护 .....	174
一、机组运行安全保护系统 .....	175
二、微控制器抗干扰保护系统 .....	176
三、安全链 .....	177
第三节 信号测量 .....	178

一、需要检测的信号 .....	178
二、主要信号测量技术 .....	178
第四节 人机界面 .....	187
一、运行操作 .....	187
二、状态显示 .....	188
三、故障监测 .....	191
<b>第七章 风力发电机组的运行 .....</b>	<b>192</b>
第一节 常规运行过程 .....	192
一、风力发电机组的稳态工作点 .....	192
二、风力发电机组工作状态及其转换 .....	193
三、机组的起动方式 .....	195
第二节 定桨距-双速发电机机组 .....	196
一、叶片安装角的调整 .....	196
二、双速发电机 .....	197
三、运行过程 .....	198
四、双速发电机机组控制系统 .....	201
第三节 变桨距-优化转差机组 .....	204
一、机组的结构特点 .....	204
二、运行状态 .....	205
三、带调整发电机转差率的变桨距系统 .....	206
四、发电机转子电流控制技术 .....	208
第四节 变桨距-变速恒频机组 .....	213
一、起动与关机 .....	213
二、最佳风能利用系数 .....	215
三、风电机组的运行区域 .....	216
四、变速恒频运行状态 .....	217
五、变速控制策略 .....	217
六、变桨距、变速双重控制 .....	220
七、过渡区域功率控制方式 .....	221
<b>第八章 支撑体系 .....</b>	<b>225</b>
第一节 机舱壳体 .....	225
一、机舱底盘 .....	225
二、机舱罩 .....	225
三、整流罩 .....	226
第二节 塔架 .....	226
一、塔架的分类 .....	227

二、塔架结构 .....	228
三、塔架的固有频率 .....	231
四、塔架-风轮系统振动模态 .....	232
五、搬运及安全设备 .....	235
第三节 基础 .....	236
一、陆上风力发电机组的基础 .....	236
二、海上风力发电机组的基础 .....	238
第四节 接地与避雷 .....	239
一、电气接地保护 .....	239
二、避雷系统 .....	241
<b>第九章 风力发电机组的维护 .....</b>	<b>246</b>
第一节 风力发电机组的维护概述 .....	246
一、维护周期 .....	246
二、维修所需的常用工具 .....	246
第二节 风力机的维护 .....	247
一、叶片的维护 .....	247
二、叶片轴承的维护 .....	250
三、轮毂的维护 .....	250
第三节 发电系统的维护 .....	250
一、发电机的维护及故障分析 .....	250
二、变流系统的维护及故障处理 .....	253
三、变压器的维护 .....	254
第四节 主传动与制动系统的维护 .....	255
一、齿轮箱的使用及维护 .....	255
二、齿轮箱常见故障及排除 .....	258
三、联轴器的维护 .....	261
四、制动机构的维护及故障排除 .....	261
第五节 变桨距、偏航及辅助系统的维护 .....	263
一、变桨距系统的维护 .....	263
二、偏航系统的维护及常见故障 .....	266
三、液压系统的维护及常见故障 .....	267
第六节 控制系统的故障与防护 .....	269
一、控制系统的常见故障 .....	269
二、减少故障的方法 .....	271
第七节 支撑体系的维护 .....	272
一、联接件的维护 .....	272

---

二、结构件的维护 .....	273
三、电缆和电缆夹块的维护 .....	273
四、塔基水平度检测 .....	273
五、塔筒标识的维护 .....	274
六、接地装置的维护 .....	274
附录 中华人民共和国国家标准 电工术语 风力发电机组 .....	275
参考文献 .....	284

# 第一章

## 绪论



本章主要介绍了风资源的相关知识，风力发电机组的构成及其分类，以及风力发电机组的工作原理和常见机型。

### 第一节 风

#### 一、风的形成

风的形成是空气流动的结果。在地球上，风的成因主要是大气环流、季风环流和局地环流。

##### 1. 大气环流

大气环流是指在全球范围内空气沿一封闭轨迹的运动。它是地球绕太阳运转过程中日地距离和方位不同，地球上各纬度所接受的太阳辐射强度各异所造成的。赤道和低纬地区比极地和高纬地区太阳辐射强度高，地面和大气接受的热量多，因而温度高。这种温差使北半球等压面向北倾斜，高空空气向北流动（以下均以北半球为例说明）。

地球在自转，使水平运动的空气受到偏向的力，称为地转偏向力，又叫做科里奥利力（Coriolis forces），简称偏向力或科氏力。这种力使北半球气流向右偏转，所以地球大气运动除受温度影响外，还要受地转偏向力的影响。气流真实运动是由于这两个因素综合作用的结果。

地转偏向力在赤道为零，随着纬度的增高而增大，在极地达到最大。当空气由赤道两侧上升向极地流动时，开始因地转偏向力很小，空气基本受温度影响，在北半球，高空气流由南向北流动，随着纬度的增加，地转偏向力逐渐加大，空气运动也就逐渐的向右偏转，也就是逐渐转向东方。在纬度 $30^\circ$ 附近，偏角到达 $90^\circ$ ，地转偏向力与温度影响作用力相当，空气运动方向与纬圈平行，所以在纬度 $30^\circ$ 附近上空，赤道来的气流受到阻塞而聚积下沉，造成这一地区地面气压升高，就是所谓的副热带高压。

副热带高压下沉气流分为两支。一支从副热带高压区流向赤道。在地转偏



向力的作用下，北半球吹东北风，风速稳定且不大，约3~4级，这是所谓的信风，所以从赤道至北纬30°之间的地带称为信风带。这一支气流补充了赤道上空气流，构成了一个闭合的环流圈，称为哈德来（Hadley）环流，也叫做正环流圈。在北半球此环流圈南面上升，北面下沉。

另一支从副热带高压区向极地流动的气流，在地转偏向力的作用下吹西风，且风速较大，这就是所谓的西风带。在纬度60°附近处，西风带遇到了由极地流来的冷空气，被迫沿冷空气上面爬升，在纬度60°地面出现一个副极地低压带。

副极地低压带的上升气流，到了高空又分成两股，一股向南，一股向北。在北半球向南的一股气流在副热带地区下沉，构成一个中纬度闭合圈，正好与哈德来环流流向相反，此环流圈北面上升、南面下沉，所以叫反环流圈，也称费雷尔（Ferrel）环流圈；向北的一股气流，从上空到达极地后冷却下沉，形成极地高压带，这股气流补偿了地面流向副极地带的气流，而且形成了一个闭合圈，此环流圈南面上升、北面下沉，是与哈德来环流流向类似的环流圈，因此也叫正环流。在北半球，此气流由北向南，受地转偏向力的作用，吹偏东风，在60°~90°N之间，形成了极地东风带。

综合上述，在地球上由于地球表面受热不均，引起大气层中空气压力不平衡，因此形成地面与高空的大气环流。各环流圈的高度，以热带最高，中纬度次之，极地最低，这主要是由于地球表面增热程度随纬度增高而降低的缘故。这种环流在地球自转偏向力的作用下，形成了赤道到纬度30°环流圈、30°~60°环流圈和纬度60°~90°环流圈，这便是著名的“三圈环流”，如图1-1所示。三

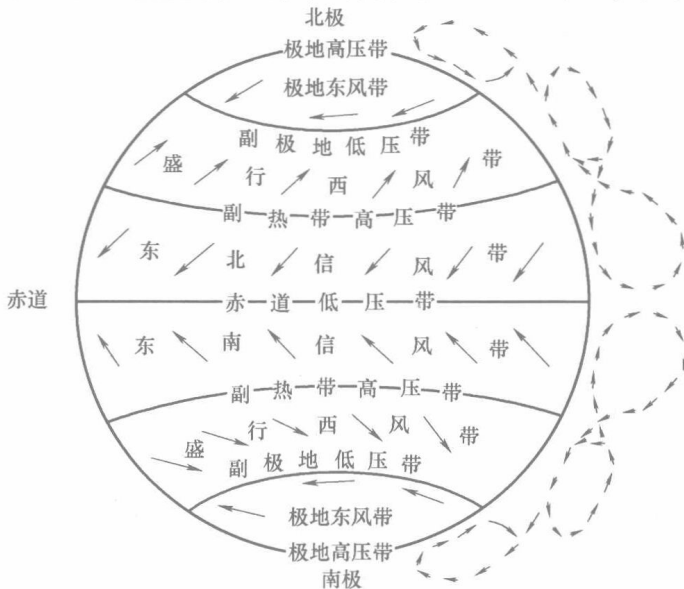


图 1-1 三圈环流示意图