


第3版

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

风力发电机组 的控制技术

叶杭冶◎编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

第3版前言

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

风力发电机组的控制技术

第3版

叶杭冶 编著



机械工业出版社

本书主要介绍变速恒频风电机组的控制技术。在风轮空气动力学原理和能量转换原理的基础上,系统地介绍了风电机组的特性,风电机组的并网技术,变速恒频风电机组的控制目标、控制策略和常用的控制方法及控制器的设计方法;介绍了风电机组的状态监测与性能测试技术;讨论了独立变桨控制技术、自适应控制技术、模糊逻辑控制技术在风电机组上的应用,探讨了风电机组的系统辨识。

本书主要供从事风力发电技术研究的工程技术人员参考,也可作为高等学校相关专业的教师、研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组的控制技术/叶杭冶编著. —3版. —北京:机械工业出版社, 2015.5

ISBN 978-7-111-50017-9

I. ①风… II. ①叶… III. ①风力发电机-机组-控制系统
IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第081285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:付承桂 责任编辑:张沪光

责任校对:佟瑞鑫 封面设计:马精明

责任印制:刘 岚

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2015年7月第3版第1次印刷

169mm×239mm·21.5印张·415千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-50017-9

定价:58.00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

读者购书热线:010-68326294 机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

第3版前言

PREFACE

近10年来,我国风力发电持续高速发展。《风力发电机组的控制技术》第2版自2005年出版发行到2013年重印了7次,被国内专业期刊论文引用1500余次。在科学技术快速发展时期,一本技术专著能够在这么长时间里拥有读者,使我深受鼓舞。但不可否认,第2版中的许多内容已经不再适用,随着风电场建设规模的不断扩大和风电机组的大型化,新技术的开发与应用受到业界的广泛关注。在这期间,作者参与完成了国家863计划“大型风力发电机组的独立变桨技术”“风电机组智能控制技术及在线监测技术”和国家973计划“风力发电系统辨识与自适应控制机理研究”等课题的研究。为了回报广大读者的厚爱,作者将这些课题的研究报告整理后编入了第3版,分别为第七章风电机组的独立变桨控制技术、第八章自适应控制在风电机组上的应用、第十章风电机组的系统辨识。上述课题的主要研究人员潘东浩教授级高工、许国东高级工程师、应有工程师和孙勇工程师给予了大力支持,在此深表感谢。本次再版同时对原有的章节做了删改和补充,其中包括:第四章补充介绍了双馈异步风电机组的并网技术、永磁同步风电机组的并网技术和风电机组对电网稳定性的影响;第五章介绍了变速恒频风电机组的控制目标、控制策略和常用的控制方法和手段;第六章介绍了变速恒频风电机组控制器的设计方法,并增加了风电机组的状态监测与性能测试(第十一章)。由于新编入的内容仍然在研究与探讨之中,仅供读者参考,如有不当之处,敬请批评指正。

作者

于2015年3月21日

第2版前言

PREFACE

本书自第1版发行后，国内风力发电开始进入大规模开发时期，从事风力发电技术装备研发和产业化的人越来越多。为了满足读者的需求，同时考虑到风力发电技术的迅速发展，对本书进行了再版。

与第1版相比，第2版主要在以下几个章节作了较大修改：

第七章控制系统的执行机构，增加了第三节采用电机驱动的变距系统。

第八章变速风力发电机组，将第二节改为变速发电机及其控制方式，并对第一部分进行了重写。

第十一章风力发电机组的智能控制，增加了第二节模糊转速控制器的设计。

此外对第一章绪论也作了删改；对书中其他章节中个别文字与插图的错误作了订正。

作者

第1版前言

PREFACE

对现代并网风力发电机组的研究已有 20 多年的历史,并且每年在世界各地都举办了各种形式的学术研讨会,发表数以百计的学术论文,但至今为止,国内外系统介绍现代并网风力发电技术的书籍仍然寥若晨星。多年前虽然出版过一些介绍风力机空气动力学原理和能量转换原理的书籍,并且这些基本原理对于大型风力发电机组的研究仍然是适用的,但现代并网风力发电机组所涉及的技术和理论已远远超出了这一范围。

本书在风力机的空气动力学原理和能量转换原理的基础上,系统地介绍了定桨距风力发电机组、变桨距风力发电机组、变速风力发电机组的基本控制要求与控制策略;介绍了风力发电机组的软并网技术、变桨距技术和变速风力发电机组在实现对最佳功率曲线的跟踪过程中的各种控制和处理方法。在介绍变速风力发电机组控制技术的基础上,对基于模糊逻辑控制和神经网络的智能控制系统也作了简要介绍。最后介绍了对电力电子器件引入谐波和变功率因数问题的控制方案。

由于风力发电机组的控制主要是对风轮的转速和输入功率进行控制,这些都涉及风轮的能量转换过程及与之密切相关的空气动力学问题。为此先在第二章中对风力机的基础理论作一简要介绍。此后为了循序渐进,先介绍定桨距风力发电机组和变桨距风力发电机组的控制技术,以及与控制技术密切相关的伺服系统。在此基础上介绍变速风力发电机组的控制技术,讨论各种控制策略、处理方法及模拟试验结果。

作者多年来一直从事风力发电技术研究,参与设计了多种型号的定桨距和变桨距风力发电机组,因而可以从比较实用的角度介绍这两种机组的控制技术。对于变速风力发电机组则主要从理论分析与实验研究的角度予以介绍,所引用的国外最新技术成果已在参考文献中全部列出。

本书的出版荣幸地受到机械工业出版社基金支助,还受到国家高技术研究发展计划专项经费资助。

本书主要供从事风力发电机组设计、研究的工程技术人员参考,也可作为理工科大学电机及控制专业教师和研究生的参考书。

书中的错误恳请读者批评指正。

作者于 2002 年 1 月 8 日

目 录

CONTENTS

第3版前言	
第2版前言	
第1版前言	
第一章 绪论	1
第一节 控制技术的研究内容	1
第二节 风力发电机组的总体结构	2
第三节 控制系统的研究方法	5
第二章 风力机的基础理论	7
第一节 风力机的能量转换过程	7
第二节 桨叶的几何参数和空气动力特性	10
第三节 风轮的气动力学	16
第四节 简化的风力机理论	17
第五节 涡流理论	21
第三章 风电机组的特性分析	28
第一节 风电机组的基本特性	28
第二节 传动系统的动态特性	37
第三节 发电机及变流器的特性	39
第四章 风电机组的并网技术	52
第一节 定桨恒速风电机组的软并网技术	52
第二节 双馈异步风电机组的并网技术	59
第三节 永磁同步风电机组的并网技术	62
第四节 风电机组对电网稳定性的影响	64
第五章 变速恒频风电机组的控制	74
第一节 变速恒频风电机组的控制目标	74
第二节 变速恒频风电机组的控制策略	75
第三节 常用的控制方法和手段	81
第六章 变速恒频风电机组控制器的设计	86
第一节 控制系统的设计方法	86
第二节 控制系统的设计过程	99

第三节	查表控制与最优控制	120
第四节	外部控制器的设计	127
第五节	外部控制器的实现	143
第七章	风电机组的独立变桨控制技术	158
第一节	大型风电机组独立变桨控制技术理论研究	158
第二节	基于不同载荷测量的独立变桨控制实现方案研究	167
第三节	基于测量叶根载荷的独立变桨控制系统设计	168
第四节	独立变桨控制的仿真分析研究	185
第五节	基于 LGQ 控制的独立变桨控制技术研究	205
第八章	自适应控制技术在风电机组上的应用	211
第一节	自适应控制技术在转矩控制中的应用	211
第二节	自适应控制技术在变桨控制中的应用	215
第九章	基于模糊逻辑的转速控制	224
第一节	模糊逻辑控制	224
第二节	模糊逻辑转速控制器	229
第三节	仿真与模拟研究	235
第十章	风电机组的系统辨识	239
第一节	系统辨识理论	239
第二节	基于风电机组模型的系统辨识方法	252
第三节	基于 LPV 的风电机组系统辨识	283
第四节	半物理仿真平台上风电机组的系统辨识	291
第十一章	风电机组的状态监测与性能测试	298
第一节	风电机组的状态监测	298
第二节	风电机组的性能测试	313
参考文献	332

第一章 绪 论

能源、环境是当今人类生存和发展所要解决的紧迫问题。常规能源以煤、石油、天然气为主，它不仅资源有限，而且会造成严重的大气污染。因此，对可再生能源的开发利用，特别是对风能的开发利用，已受到世界各国的高度重视。据专家们估计，地球上所接收到的太阳辐射能大约有 2% 转换成风能，可装机发电达 10TW，每年可发出电力 18PW·h。近 10 年来风力发电在全球范围持续高速增长，2014 年全球装机容量已超过 369GW。风力发电的高速发展，促进了风力发电技术的不断进步，为风力发电更大规模的发展提供了可能。

第一节 控制技术的研究内容

随着风电机组单机容量的增大和风力发电在电网中的比例不断提高，风力发电机组控制技术的研究范围不断扩大，目前大致可分为两个层面。一是以提高风力发电机组单机性能为目标的控制技术（机级控制），其中包括以实现最大风能转换效率为目的的风轮转速对风速的跟踪技术；以降低不平衡、不对称或间歇性载荷为目的的各种变桨控制技术和独立变桨控制技术；以提高电网友好性为目的的电网故障穿越技术等，以及与上述密切相关的机组的建模与仿真技术和系统辨识技术研究；二是以提高风电场运行有效性和电网的安全性为目标的控制技术（场级控制），其中包括风电场在线监测和远程监控及数据统计分析技术；风电场短时功率预测和调度技术等。本书主要讨论机级控制。

风力发电机组的控制系统是一个综合管理平台。它不仅要监视电网、风况和机组的运行参数，在各种风况或故障情况下确保机组和电网的安全性与可靠性；还要根据风速与风向的变化以及电网情况对机组进行优化控制，以保证机组高效、稳定地运行；还要根据电网的要求，进行能量的调度和控制。

在风力发电技术的发展过程中，控制技术始终起着主导作用，并且随着风力发电技术的发展，其重要性更加突出。20 世纪 80 年代中期，定桨恒速风力发电机组实现了商业化运行，它主要解决了风力发电机组的并网问题和运行的安全性与可靠性问题。定桨恒速风力发电机组采用了软并网技术、空气动力制动技术、偏航与自动解缆技术，这些都是并网运行的风力发电机组需要解决的最基本的问题。由于功率输出是由桨叶自身的性能来限制的，叶片的桨距角在安装时已经固定，而发电机的转速受到电网频率限制。因此，只要在允许的风速范围内，定桨



恒速风力发电机组的控制系统在运行过程中对由于风速变化引起输出能量的变化是不作任何控制的。这就大大简化了控制技术和相应的伺服传动技术,使得定桨恒速风力发电机组能够在较短时间内大规模推广运行。

20世纪90年代初期,基于高转差率异步发电机进行有限变速的全桨变距风力发电机组开始进入风力发电市场。采用全桨变距的风力发电机组,启动时可对转速进行控制,并网后可对功率进行控制,使风力发电机组的启动性能和功率输出特性都有显著的改善。这时,风力发电机组的液压系统不再是简单的以制动为目的的执行机构,为实现变桨控制,它采用电液比例阀或电液伺服阀组成了闭环控制系统,使风力发电机组的控制水平提高到一个新的阶段。

由于有限变速的全桨变距风力发电机组在额定风速以下运行时的效果仍不理想,到了20世纪90年代中期,基于变速恒频技术的全桨变距风力发电机组开始进入风电市场。变速恒频风力发电机组与定桨恒速风力发电机组的根本区别在于,变速恒频风力发电机组风轮转速可以跟随风速变化,从而使机组获得最佳功率输出特性。变速恒频风力发电机组的主要特点:低于额定风速时,它能最大限度跟踪最佳功率曲线使风力发电机组具有较高的风能转换效率;高于额定风速时,它可以增加传动系统的柔性,使功率输出更加稳定,特别是解决了电网瞬时故障穿越等问题后,达到了高效率、高质量地向电网提供电能的目的。

今后风电机组控制技术的总体发展方向是智能化,机级和场级控制融合在一起。新一代物联网技术、传感检测技术、大数据和云计算将更多地应用到风电机组的控制系统,同时风电机组故障自诊断和自修复技术,部件寿命预测及评估技术日趋成熟,并结合预测和采集气象、风况、电网等外部信息,进一步提升机组的性能,提升机组对环境和电网的适应性,提高机组发电量的可预测性、可控制性和可调度性,保证风电场整个运行生命周期的经济性。风电机组在未来的控制应该是一种实时数据驱动性的方式,以经济性指标为准则,能实时定量分析每一控制行为对机组所有零部件寿命的影响,通过自身的控制行为实现设备寿命平衡与发电性能指标的综合优化。

第二节 风力发电机组的总体结构

并网型风力发电机组形式有采用笼型异步发电机的定桨恒速风力发电机组(见图1-1)和全桨变距的变速恒频风力发电机组。后者主要有采用双馈式异步发电机的变速恒频风力发电机组(见图1-2)和采用永磁式同步发电机的变速恒频风力发电机组(见图1-3)。

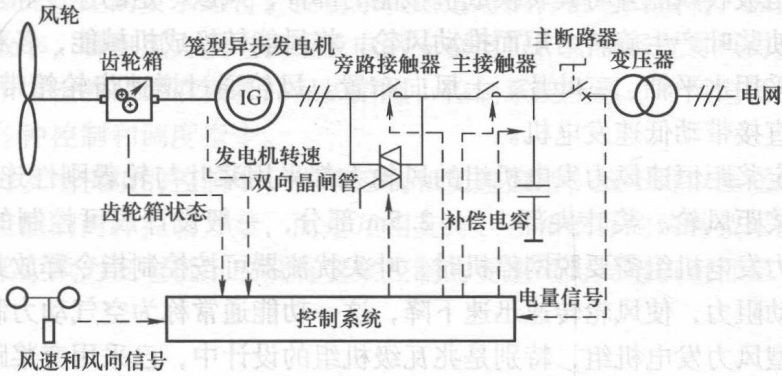


图 1-1 定桨恒速风力发电机组总体结构

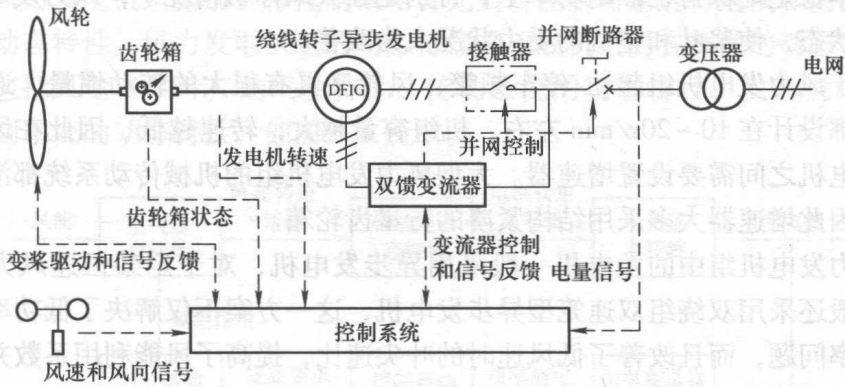


图 1-2 双馈异步式变速恒频风力发电机组总体结构

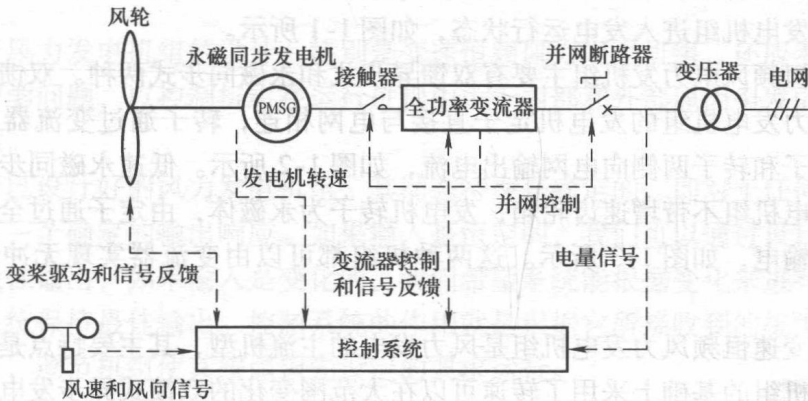


图 1-3 永磁同步式变速恒频风力发电机组总体结构

风轮是吸收风能并将其转换成机械能的部件，风以一定的速度和攻角作用在桨叶上，使桨叶产生旋转力矩而推动风轮，将风能转换成机械能，各种机型的风轮一般均采用水平轴、三叶片、上风向布置。风轮通过增速齿轮箱带动发电机，或者也可直接带动低速发电机。

早期定桨距恒速风力发电机组的风轮大都采用桨叶与轮毂刚性连接的结构，即所谓定桨距风轮。桨叶尖部 1.5 ~ 2.5m 部分，一般设计成可控制的叶尖扰流器。当风力发电机组需要脱网停机时，叶尖扰流器可按控制指令释放并旋转大角度形成气动阻力，使风轮转速迅速下降，这一功能通常称为空气动力制动。

在大型风力发电机组，特别是兆瓦级机组的设计中，已采用变桨距风轮，桨叶与轮毂不再采用刚性连接，而通过专门为变距机构设计的变距轴承连接。这种风轮可根据风速的变化调整气流对叶片的攻角，当风速超过额定风速后，输出功率可基本稳定地保持在额定功率上；特别是在大风停机情况下，风力发电机组处于顺桨状态，使桨叶和整机的受力状况大为改善。

由于风力发电机组起动/停车频繁，风轮又具有很大的转动惯量，通常风轮的转速都设计在 10 ~ 20r/min 左右，机组容量越大，转速越低，因此在风轮与高速的发电机之间需要设置增速器。大型风力发电机组的机械传动系统都沿中心线布置，因此增速器大多采用结构紧凑的行星齿轮箱。

风力发电机组中的发电机一般采用异步发电机，对于定桨恒速风力发电机组，一般还采用双绕组双速笼型异步发电机，这一方案不仅解决了低功率时发电机的效率问题，而且改善了低风速时的叶尖速比，提高了风能利用系数并降低了运行时的噪声。

对于定桨恒速风力发电机组和全桨变距有限变速风力发电机组，发电机并网过程采用晶闸管限流软切入，过渡过程结束时，旁路接触器合上，晶闸管被切除，风力发电机组进入发电运行状态，如图 1-1 所示。

变速恒频风力发电机组主要有双馈异步式和永磁同步式两种。双馈异步式变速恒频风力发电机组的发电机定子直接与电网相连，转子通过变流器与电网相连，从定子和转子两侧向电网输出电流，如图 1-2 所示。低速永磁同步式变速恒频风力发电机组不带增速齿轮箱，发电机转子为永磁体，由定子通过全功率变流器向电网输电，如图 1-3 所示。这两种机组都可以由变流器实现无冲击并网和脱网。

目前变速恒频风力发电机组是风力发电的主流机型，其主要特点是在变桨距风力发电机组的基础上采用了转速可以在大范围变化的双馈式异步发电机或永磁同步发电机及相应的电力电子技术，通过对最佳叶尖速比的跟踪，使得风力发电机组在所有的风速下均可获得最佳的功率输出。

风力发电机组控制系统通过采集风力发电机组及其工作环境信息，调节机组

使其按照预先设定的要求运行；控制系统通过对执行机构的控制，提高风力发电机组运行效率，确保风力发电机组及电网安全运行；控制系统对风力发电机组出现的故障予以检测并采取完善的保护措施；控制系统还通过与风电场和电网的联系，接受各种控制和调度指令。

在风力发电机组的控制中，变桨控制和变速控制一般不可以独立地用作风力发电机组控制的两种控制方案，而是互相支持、互相依存的两种技术。没有变速控制的变桨距风力发电机组或没有变桨控制的变速风力发电机组都是难以稳定运行的。

第三节 控制系统的研究方法

对风力发电机组施加各种控制策略首先要对控制对象进行建模和仿真，研究机组的动态特性。风力发电机组的动态特性是构成机组的各部件的动态特性的总和，它包括风轮（桨叶）的气动特性、传动系统的动态特性、发电机的动态特性及控制系统的动态特性，如图 1-4 所示。

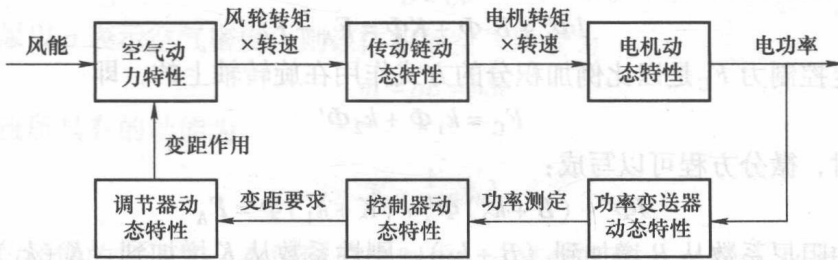


图 1-4 风力发电机组的动态特性

对于风力发电机组的设计，特别是变速恒频风力发电机组，还应考虑整机的结构动力学问题，以控制机组在运行过程中由于内部和外部原因引发的系统不稳定性问题。

一台已设计好的风力发电机组，其动态特性是确定的，即对于任何给定的输入，它有一个确定的输出响应。如果输入是恒定的，我们可以通过设计，使得系统具有最佳输出；如果输入是变化的，我们希望系统能根据变化来进行适当的调整，使系统保持最佳输出。控制系统的作用就是根据它所接收到的机组及其工作环境信息，调节机组使其按照预先设定的要求运行。

对于定桨恒速风力发电机组，当输入变化时，控制系统对机组的调整非常有限，如当风向改变时，通过偏航系统调整其风轮方向，或在风速变化时切换发电机绕组，进行变极调速，对其动态响应特性没有施加任何影响，因此在输入变化



的情况下，风力发电机组只有很小机会运行在最佳状态下。机组的控制方式如图 1-5 所示。



图 1-5 定桨恒速风力发电机组的控制方式

对于变速恒频风力发电机组，由于采用了闭环控制（见图 1-2），控制系统完全决定了系统的动态响应特性，并且可以根据输入的变化对输出进行控制。

表示风力发电机组动态特性的微分方程通常写成如下形式：

$$I\Phi'' + B\Phi' + K\Phi = F_A \quad (1-1)$$

式中 I ——风力发电机组的转动惯量；

B ——阻尼系数；

K ——传动系统刚性系数；

F_A ——驱动力；

Φ ——轴的旋转角度。

当系统加入控制力 F_C 后，其动态特性方程改变为

$$I\Phi'' + B'\Phi' + K\Phi = F_A - F_C \quad (1-2)$$

假定控制力 F_C 是以比例加积分的方式作用在旋转轴上的，即

$$F_C = k_1\Phi + k_2\Phi' \quad (1-3)$$

这时，微分方程可以写成：

$$I\Phi'' + (B + k_2)\Phi' + (K + k_1)\Phi = F_A \quad (1-4)$$

其中阻尼系数从 B 增加到 $(B + k_2)$ ，刚性系数从 K 增加到 $(K + k_1)$ 。

从式 (1-4) 可以看到，由于控制系统的作用，改变了系统的动态特性，但系统的物理参数和所受的外力并没有改变。

对风力发电机组控制技术的研究主要集中在经典控制理论与技术方面，已有一些成熟的建模和仿真软件可用于控制系统的设计。但由于大型风力发电机组的结构设计极具个性，加之空气动力学的不确定性和电力电子模型的复杂性，模型的建立不是件容易的事情。虽然可供建模和仿真研究的商业软件在不断地更新，但其结果仍然需要验证。因此，对样机进行系统辨识，是完成整机设计必不可少的环节。为了弥补经典控制技术的缺陷，应对运行环境条件的变化问题，自适应控制技术、基于模糊逻辑和神经网络的智能控制技术也被引入风力发电机组的控制系统。本书将对上述方法做力所能及的介绍。

第二章 风力机的基础理论

第一节 风力机的能量转换过程^[1,2]

一、风能的计算

由流体力学可知，气流的动能为

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2-1)$$

式中 m ——气体的质量；

v ——气体的速度。

设单位时间内气流流过截面积为 S 的气体的体积为 L ，则

$$L = Sv$$

如果以 ρ 表示空气密度，则该体积的空气质量为

$$m = \rho L = \rho Sv$$

这时气流所具有的动能为

$$E = \frac{1}{2}\rho Sv^3 \quad (2-2)$$

上式即为风能的表达式。在国际单位制中， ρ 的单位是 kg/m^3 ， L 的单位是 m^3 ， v 的单位是 m/s ， E 的单位是 W 。

从风能公式可以看出，风能的大小与气流密度和通过的面积成正比，与气流速度的三次方成正比。其中 ρ 和 v 随地理位置、海拔、地形等因素而变。

二、自由流场中的风轮

风力机的第一个气动理论是由德国的 Betz 于 1926 年建立的。

Betz 假定风轮是理想的，即它没有轮毂，具有无限多的叶片，气流通过风轮时没有阻力；此外，假定气流经过整个风轮扫掠面时是均匀的；并且，气流通过风轮前后的速度为轴向方向。

现研究一理想风轮在流动的大气中的情况（见图 2-1），并规定：

v_1 ——距离风力机一定距离的上游风速；

v ——通过风轮时的实际风速；

v_2 ——离风轮远处的下游风速。

设通过风轮的气流其上游截面为 S_1 ，下游截面为 S_2 。由于风轮的机械能量



仅由空气的动能降低所致，因而 v_2 必然低于 v_1 ，所以通过风轮的气流截面积从上游至下游是增加的，即 S_2 大于 S_1 。

如果假定空气是不可压缩的，由连续条件可得

$$S_1 v_1 = S v = S_2 v_2$$

风作用在风轮上的力可由 Euler 理论写出：

$$F = \rho S v (v_1 - v_2) \quad (2-3)$$

故风轮吸收的功率为

$$P = F v = \rho S v^2 (v_1 - v_2) \quad (2-4)$$

此功率是由动能转换而来的。从上游至下游动能的变化为

$$\Delta E = \frac{1}{2} \rho S v (v_1^2 - v_2^2) \quad (2-5)$$

令式 (2-4) 与式 (2-5) 相等，得到：

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2-6)$$

则作用在风轮上的力和提供的功率可写成：

$$F = \frac{1}{2} \rho S v (v_1^2 - v_2^2) \quad (2-7)$$

$$P = \frac{1}{4} \rho S v (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \quad (2-8)$$

对于给定的上游速度 v_1 ，可写出以 v_2 为函数的功率变化关系，将式 (2-8) 微分得

$$\frac{dP}{dv_2} = \frac{1}{4} \rho S v (v_1^2 - 2v_1 v_2 - 3v_2^2)$$

式 $\frac{dP}{dv_2} = 0$ 有两个解：① $v_2 = -v_1$ ，没有物理意义；② $v_2 = v_1/3$ ，对应于最大功率。

以 $v_2 = \frac{v_1}{3}$ 代入 P 的表达式，得到最大功率为

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho S v_1^3 \quad (2-9)$$

将上式除以气流通过扫掠面 S 时风所具有的动能，可推得风力机的理论最大效率（或称理论风能利用系数）：

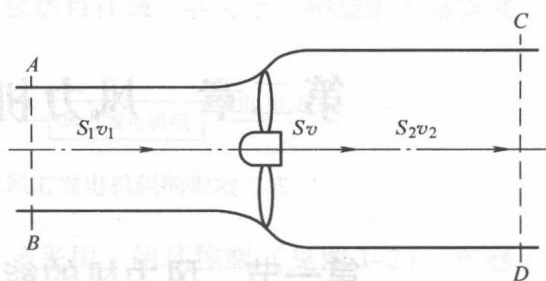


图 2-1 风轮的气流图

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\max}}{\frac{1}{2}\rho v_1^3 S} = \frac{(8/27)S\rho v_1^3}{\frac{1}{2}S\rho v_1^3} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (2-10)$$

式(2-10)即为有名的贝兹(Betz)理论的极限值。它说明,风力机从自然风中所能索取的能量是有限的,其功率损失部分可以解释为留在尾流中的旋转动能。

能量的转换将导致功率的下降,它随所采用的风力机和发电机的型式而异,因此风力机的实际风能利用系数 $C_P < 0.593$ 。风力机实际能得到的有用功率输出是

$$P_s = \frac{1}{2}\rho v_1^3 S C_P \quad (2-11)$$

对于每平方米扫风面积则有

$$P = \frac{1}{2}\rho v_1^3 C_P \quad (2-12)$$

三、风力机的特性系数

在讨论风力机的能量转换与控制时,以下特性系数具有特别重要的意义。

1. 风能利用系数 C_P

风力机从自然风能中吸取能量的大小程度用风能利用率系数 C_P 表示,由(2-11)知

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho v^3 S} \quad (2-13)$$

式中 P ——风力机实际获得的轴功率 (W);

ρ ——空气密度 (kg/m^3);

S ——风轮的扫风面积 (m^2);

v ——上游风速 (m/s)。

2. 叶尖速比 λ

为了表示风轮在不同风速中的状态,用叶片的叶尖圆周速度与风速之比来衡量,称为叶尖速比 λ 。

$$\lambda = \frac{2\pi Rn}{v} = \frac{\omega R}{v} \quad (2-14)$$

式中 n ——风轮的转速 (r/s);

ω ——风轮角频率 (rad/s);

R ——风轮半径 (m);

v ——上游风速 (m/s)。

3. 扭矩系数 C_T 和推力系数 C_F

为了便于把气流作用下风力机所产生的扭矩和推力进行比较,常以 λ 为变