

风力发电机组 控制技术

Control Technology of
Wind Power Generation System

霍志红 郑源 编著
左潞 张德虎



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

风力发电机组 控制技术

霍志红 郑源 编著
左潞 张德虎



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



内 容 提 要

本书重点介绍了风力机的基本理论,定桨距、变桨距、变速型等风力发电机组的特点、控制系统的结构及基本控制策略,风力发电机组的偏航系统、液压与制动系统、监控系统、数据采集系统以及变速恒频风力发电技术,风力发电机组的并网技术,风力发电机组的故障诊断的基本原理、常见故障以及故障诊断技术,基于T-S模糊模型的风力发电机组稳定性分析方法,建立了具有参数不确定性的风能转换系统模型,并基于模糊控制理论分析了风能转换系统的稳定性问题,给出了使系统稳定的控制器的参数化表达式。

本书既可作为高等学校相关专业学生、教师的教学用书,也可作为从事风力机组控制技术研究的科研人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组控制技术 / 霍志红等编著. -- 北京 :
中国水利水电出版社, 2010.5
ISBN 978-7-5084-7515-8

I. ①风… II. ①霍… III. ①风力发电机—机组—控制系统 IV. ①TM315.03

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第091112号

书 名	风力发电机组控制技术
作 者	霍志红 郑源 左璐 张德虎 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	165mm×240mm 16开本 14印张 266千字
版 次	2010年5月第1版 2010年5月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	39.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

Preface

随着经济的快速发展,能源的消费逐年增加,常规能源资源面临日益枯竭的窘境。风能,作为未来最重要的清洁替代能源之一,对于缓解能源匮乏具有非同寻常的意义。风电事业的日益蓬勃发展,需要更多的从事风力发电方面的技术人员,河海大学于2008年率先创办了风能与动力工程专业,旨在培养风能与动力工程专业及其自动化领域具有扎实理论基础、较强实践和创新能力以及良好的国际交流能力的高级工程技术人才,以满足社会对该学科领域的工程技术、科研、经营管理等各方面的人才需求。

河海大学风能与动力工程专业开设了风力发电规划与设计、风力机、风力发电机组控制、近海风电场、风资源测量与评估、风电场施工与管理、风电场数字仿真等一系列专业课程,由于国内还没有这方面的正式出版的教材,所以自编本教材供学生使用,在风能与动力工程专业的建设上迈出了关键的一步。

本书共分十一章:第一章绪论对风力发电以及风力发电机组控制系统的发展概况做了简单的介绍;第二章介绍了风力机的基本理论,包括风力机的空气动力学基础及桨叶受力分析;第三章介绍了风力发电机组控制系统的组成、基本工作原理、基本控制要求以及风力机控制技术的发展趋势;第四章介绍了定桨距、变桨距、变速风力发电机组控制系统各自的特点以及基本控制策略;第五章着重介绍了偏航系统的结构组成、工作原理及偏航系统的技术要求及维护;第六章介绍了风力发电机组液压与制动系统的组成结构及工作原理、电动变桨距系统的基本工作原理等;第七章介绍了变速恒频风力发电技术、交流励磁双馈发电机的矢量控制技术以及直驱式永磁同步风力发电技术;第八章介绍了风力发电机组的并网控制技术、

双 PWM 变频器原理以及低压穿越技术；第九章介绍了风力发电机组的监控系统、风力发电机组的噪声控制技术以及海上风力发电技术；第十章主要介绍了风力发电可能存在的问题，风力发电机组的常见故障、控制系统的故障诊断技术以及机组的运行与维护；第十一章介绍了模糊控制理论在风力发电机组控制系统中的应用，其中包括风力机组模糊控制器设计、基于 T-S 模糊模型的风力机组稳定性分析。

感谢河海大学能源与电气学院系的各位领导和老师对本书的关注、支持与帮助！在此，特别感谢郑源老师、许昌老师、赵振宙老师等给予的无私帮助！

本书的编著参阅了大量参考文献和网上资料，在此对各位作者一并表示感谢！由于水平有限，书中错误和疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

霍志红

2010.1

目 录

Contents

前言

第一章 绪论	1
--------------	---

第二章 风力机的基本理论	3
--------------------	---

第一节 风力机的结构及分类	3
---------------------	---

第二节 风力机的空气动力学基础	6
-----------------------	---

第三节 风力机桨叶受力分析	10
---------------------	----

第四节 风轮气动功率调节	12
--------------------	----

第三章 风力发电机组的控制系统	15
-----------------------	----

第一节 风力发电机组控制系统的基本组成	15
---------------------------	----

第二节 风力发电机组的基本控制要求	17
-------------------------	----

第三节 风力发电机组控制技术发展趋势	22
--------------------------	----

第四章 典型风力发电机组控制系统结构	30
--------------------------	----

第一节 定桨距风力发电机组的特点	30
------------------------	----

第二节 定桨距风力发电机组的基本控制要求	36
----------------------------	----

第三节 变桨距风力发电机组的特点	45
------------------------	----

第四节 变桨距风力发电机组的基本控制策略	50
----------------------------	----

第五节 变速风力发电机组的特点	57
-----------------------	----

第六节 变速风力发电机组的基本控制策略	64
---------------------------	----

第五章 风力发电机组的偏航系统	69
-----------------------	----

第一节 偏航系统简介	69
------------------	----

第二节 偏航系统的结构组成	70
---------------------	----

第三节	偏航控制系统工作原理	75
第四节	偏航系统的技术要求及维护	77
<hr/>		
第六章	风力发电机组的液压与制动系统	83
第一节	定桨距风力发电机组的液压系统	83
第二节	变桨距风力发电机组的液压系统	85
第三节	制动与安全保护系统	93
第四节	电动变桨系统	99
<hr/>		
第七章	变速恒频风力发电技术	103
第一节	变速恒频风力发电方案	103
第二节	交流励磁双馈发电机的数学模型	107
第三节	交流励磁变速恒频风力发电系统的运行区域	112
第四节	交流励磁双馈发电机的矢量控制	115
第五节	直驱式永磁同步风力发电系统	118
<hr/>		
第八章	风力发电机组的并网技术	122
第一节	风力发电机组并网技术概述	122
第二节	定桨距风力发电机组的并网控制	127
第三节	交流励磁变速恒频风力发电机组并网控制	129
第四节	双 PWM 变频器原理	130
第五节	风力发电机组的低压穿越技术	134
<hr/>		
第九章	风力发电机组的其他技术	138
第一节	风力发电机组的数据采集系统	138
第二节	风力发电机组的监控系统	142
第三节	风力发电机组的噪声控制	145
第四节	海上风电	146
<hr/>		
第十章	风力发电机组的故障诊断技术	151
第一节	故障诊断技术概述	151
第二节	故障诊断的基本方法	154
第三节	风力发电机组控制系统故障诊断技术	160

第四节	风力发电机组常见故障	163
第五节	风力发电机组的运行与维护	173
<hr/>		
第十一章	模糊控制在风力发电机组控制中的应用	177
第一节	模糊控制的基本概念及原理	177
第二节	风力发电系统中的模糊控制器设计	179
第三节	基于 T-S 模糊模型的风力发电机组稳定性研究	185
<hr/>		
附录	风力发电词汇	192
参考文献	212

第一章 绪 论

随着经济的快速发展,能源的消费逐年增加,常规能源资源面临日益枯竭的窘境,迫切需要一些清洁、无污染、可再生的新能源^[1-3]。在目前众多可再生能源与新能源技术开发中,风力发电有着自身独特的优势,在可再生的绿色能源开发领域中占有突出的地位,具有重要的开发利用价值,受到世界各国的普遍重视^[4-8]。

自20世纪70年代以来,风能开发和利用在欧美发达国家发展非常迅速,风力发电的技术也日趋成熟。我国对现代风力机的研制可以追溯到20世纪50年代,但系统地研究还是从20世纪70年代开始的。从20世纪80年代中期开始,我国从国外引进了一些大、中型风力发电机组并入电网。1986年山东荣城市建成中国第一个风电场,年均发电量33万kW·h,以后相继在福建平潭、广东南澳岛、新疆达坂城及内蒙古朱日和等地建立了风电场。我国在风电场的建设、运行、管理等方面都取得了许多成功经验、初步具备了规模性开发建设风电的能力和条件。

进入20世纪90年代以来,我国风电发展势头强劲,年平均增长速度在20%以上,成为我国发展速度最快的能源工业。但是,在我国安装的大型风力发电机组中90%是从国外进口,这种状况严重制约了我国民族风电产业的健康发展,成为影响我国风电规模化持续发展的潜在障碍。改变这种状况的根本途径就是要实现我国大型风力发电机组的国产化。原国家计划委员会于1996年3月制定了“乘风计划”,以风力机的国产化来带动风电场建设的产业化,该计划旨在采取技贸结合的形式,引进国外先进技术,通过消化吸收,达到自主开发,自行设计和制造大型风力机的能力。

我国对现代并网型风力机的研究工作始于20世纪80年代。从“六五”开始,国家将风能的开发利用列入科技攻关计划。在“六五”、“七五”、“八五”、“九五”和“十五”期间,原国家计划委员会和原国家科学技术委员会分别组织了综合性风能科技攻关,内容涉及风力资源、风力机空气动力学、结构动力学、电机、控制和材料等。在风力发电机组的开发研究中,我国自行研制出20kW, 30kW, 75kW, 120kW, 200kW, 600kW和1MW风力发电机组。

风力资源丰富的地区通常都在边远地区或海岛甚至是海上,自然环境较恶劣,需要无人值守和远程监控,对机组控制系统的可靠性和安全性要求较高。

目前,国内外投放市场的风力发电机组单机容量主要为 500kW~1.5MW。作为风力资源丰富的国家之一,我国在风力发电机组的国产化方面也取得了较快进展。但是我国风力发电事业还处于起步阶段,机组控制技术与国外先进技术有较大差距。风力发电机组控制系统是机组正常运行的核心,其控制技术是风力发电机组的关键技术之一,与风力发电机组的其他部分关系密切,其精确的控制、完善的功能将直接影响机组的安全与效率。因此,控制系统是风力发电机组可靠运行以及实现最佳运行的可靠保证。

目前世界上有几十种型号的大型风力发电机组在商业化运行,大体可分为四种类型。第一种为双绕组定桨距恒速机型,以 Bounsl, Bouns2, Nordex60 和 Nordex66 为代表。第二种为变滑差变速机型,主要代表机型有 Vestas V63, Vestas V66, Vestas V80。第三种是采用双馈发电机转差励磁方案,实现变速变距运行的机型。主要代表机型有 DeWind 公司的 DeWind D6、D9, Tacke 公司的 TW-1.5, TW-2.0 和 Nordex80。第四种是采用直接驱动的永磁发电机,直接采用交一直一交功率变换系统送电,如德国 Enercon E66、意大利 Gamma 60 型等。当前国外大型风力发电机组的发展趋势是单机容量越来越大,机组运行越来越可靠,而维护量越来越小。

从国内外近几年风电产业发展看,随着风电产业的不断发展,风力发电机组控制技术也在不断发展,以满足其自身对风速变化、成本、环境及稳定运行等各方面的要求,其主要发展趋势包括以下两个方面。

(1) 变桨距调节方式迅速取代失速调节方式。从目前市场情况看,变桨距调节方式能充分克服失速调节不能充分利用风能的缺陷,因此,得到了迅速的应用。

(2) 变速运行方式迅速取代恒速运行方式。由于变速运行方式能够最大限度地利用风能,提高风力机的运行效率,因而被广泛采用。

第二章 风力机的基本理论

风力机是一种叶片式机械，风机的桨叶与机翼类似，可用机翼升力理论描述。本章介绍了风力机的结构及分类、风力机空气动力学基础、桨叶受力分析以及风轮气动功率的调节等内容。

第一节 风力机的结构及分类

风力发电是将风的动能转换为机械能，再带动发电机发电，转换成电能。本节主要介绍风力机组的基本结构及分类。

一、风力机的结构

风力机的样式虽然很多，但其原理和结构总的说来还是大同小异的。这里以水平轴风力机为例作一介绍。它主要由以下几部分组成：风轮、传动机构（增速箱）、发电机、机座、塔架、调速器（限速器）、调向器、停车制动器等，如图 2-1 所示。

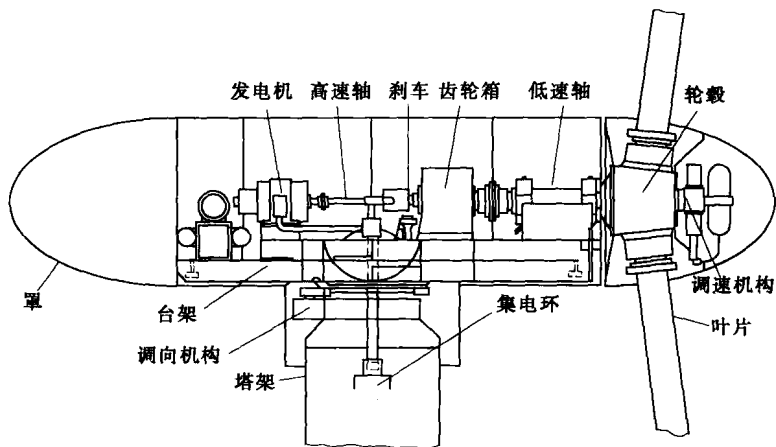


图 2-1 风力机的结构和组成

(1) 轮毂。风力机叶片都要装在轮毂上。轮毂是风轮的枢纽，也是叶片根部与主轴的连接件。所有从叶片传来的力，都通过轮毂传递到传动系统，再传



到风力机驱动的对象。同时轮毂也是控制叶片桨距（使叶片作俯仰转动）的所在。在设计中应保证足够的强度。

(2) 调速或限速装置。在很多情况下，要求风力机不论风速如何变化，转速总保持恒定或不超过某一限定值，为此，采用了调速或限速装置。当风速过高时，这些装置还用来限制功率，并减小作用在叶片上的力。调速或限速装置有各种各样的类型，但从原理上来看大致有三类：第一类是使风轮偏离主风向；第二类是利用气动阻力；第三类是改变叶片的桨距角。

(3) 塔架。风力机塔架有机舱及转子。通常高的塔架具有优势，因为离地面越高，风速越大。它可以为管状的塔架，也可以是格子状的塔架。管状的塔架对于维修人员更为安全，因为他们可以通过内部的梯子到达塔顶。格状塔架的优点在于它比较便宜。风力机的塔架除了要支撑风力机的重量，还要承受吹向风力机和塔架的风压，以及风力机运行中的动载荷。它的刚度和风力机的振动有密切关系，如果说塔架对小型风力机影响还不太大的话，对大、中型风力机的影响就不容忽视了。

(4) 机舱。机舱包含着风力机的关键设备，包括齿轮箱、发电机。维护人员可以通过风力机塔架进入机舱。

(5) 叶片。捕获风能并将风力传送到转子轴心。现代 600kW 风机上每个叶片的测量长度大约为 20m，而且被设计得很像飞机的机翼。

(6) 低速轴。风力机的低速轴将转子轴心与齿轮箱连接在一起。在现代 600kW 风电机上，转子转速相当慢，大约为 19~30r/min。轴中有用于液压系统的导管来激发空气动力闸的运行。

(7) 齿轮箱。风力机转子旋转产生的能量，通过主轴、齿轮箱及高速轴传送到发电机。使用齿轮箱，可以将风力机转子上的较低转速、较高转矩转换为用于发电机上的较高转速、较低转矩。风力机上的齿轮箱通常在转子及发电机转速之间具有单一的齿轮比。对于 600kW 或 750kW 机组的齿轮比大约为 1:50。

(8) 高速轴及其机械闸。高速轴以 1500r/min 运转，并驱动发电机。它装备有紧急机械闸，用于空气动力闸失效时或风力机被维修时使用。

(9) 发电机。通常被称为感应电机或异步发电机。在现代风机上，最大电力输出通常为 500~1500kW 或者更大（海上风力机电力输出功率已达到 5000kW）。

(10) 偏航装置。借助电动机转动机舱，以使转子正对着风。偏航装置由电子控制器操作，电子控制器可以通过风向标来感觉风向。

(11) 电子控制器。包含一台不断监控风力机状态的计算机，并控制偏航装置。为防止任何故障（即齿轮箱或发电机的过热），该控制器可以自动停止风力机的转动，并通过电话调制解调器来呼叫风力机操作员。

(12) 液压系统。用于重置风力机的空气动力闸。

(13) 风速计及风向标。用于测量风速及风向。

(14) 冷却系统。发电机在运转时需要冷却。在大部分风力机上，使用大型风扇来空冷，还有一部分制造商采用水冷。水冷发电机更加小巧，而且电效率高，但这种方式需要在机舱内设置散热器，来消除液体冷却系统产生的热量。

二、风力发电机组的分类

按照不同的分类方式，风力发电机组可分为以下几种类型。

1. 按风轮桨叶分类

(1) 失速型。高风速时，因桨叶形状或因叶尖处的扰流器动作，限制风力机的输出转矩与功率。

(2) 变桨型。高风速时通过调整桨距角，限制输出转矩与功率。

2. 按风轮转速分类

(1) 定速型。风轮保持一定转速运行，风能转换率较低，与恒速发电机对应。

(2) 变速型。

1) 双速型。可在两个设定转速之间运行，改善风能转换率，与双速发电机对应；

2) 连续变速型。在一段转速范围内连续可调，可捕捉最大风能功率，与变速发电机对应。

3. 按传动机构分类

(1) 齿轮箱升速型。用齿轮箱连接低速风力机和高速发电机（减小发电机体积重量，降低电气系统成本）。

(2) 直驱型。直接连接低速风力机和低速发电机（避免齿轮箱故障）。

4. 按发电机分类

(1) 异步型。

1) 笼型单速异步发电机；

2) 笼型双速变极异步发电机；

3) 绕线式双馈异步发电机。

(2) 同步型。

1) 电励磁同步发电机；

2) 永磁同步发电机。

5. 按并网方式分类

(1) 并网型。并入电网，可省却储能环节。



(2) 离网型。一般需配蓄电池等直流储能环节，可带交、直流负载或与柴油发电机、光伏电池并联运行。

第二节 风力机的空气动力学基础

一、风力机基础理论

1. 风速

风场的风速资料是设计风力机最基本的资料。风场的实际风速是随时间不断变化的量，因此风速一般用瞬时风速和平均风速来描述。瞬时风速是短时间发生的实际风速，也称有效风速。平均风速是一段较长时间内瞬时风速的平均值。

某地一年内发生同一风速的小时数与全年小时数（8760h）的比值称为该风速的风速频率，如图 2-2 (a) 所示，它是风能资源和风能电站可研报告的基本数据。风速与地形、地势、高度、建筑物等密切相关，风能桨叶高度处的风速才是风力机设计风速，因此，设计风电场还要有风速沿高度的变化资料，如图 2-2 (b) 所示。

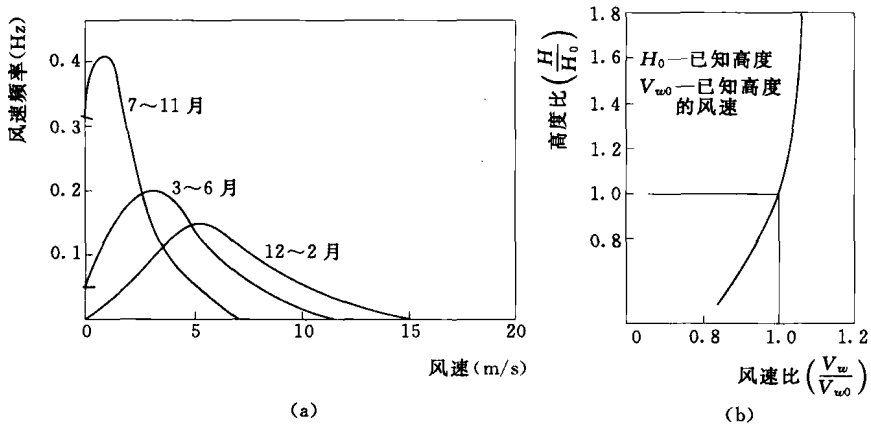


图 2-2 平均风速频率图

(a) 风速频率曲线；(b) 不同高度风速变化曲线

风的变化是随机的，任意地点的风向、风速和持续的时间都是变的，为定量地衡量风力资源，通常用风能玫瑰图来表示，如图 2-3 所示。图上射线长度是某一方向上风速频率和平均风速三次方的乘积，用以评估各方向的风能优势。

2. 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（可视为距离风力机一定距离的上游风速）。

设单位时间内气流流过截面积为 S 的气体的体积为 V ，则

$$V = Sv \quad (2-2)$$

如果以 ρ 表示空气密度，该体积的空气质量为

$$m = \rho V = \rho Sv \quad (2-3)$$

这时气流所具有的动能为

$$E = \frac{1}{2}\rho Sv^3 \quad (2-4)$$

式中 ρ ——空气密度， kg/m^3 ；

V ——气体体积， m^3 ；

v ——风速， m/s ；

E ——风能， J 。

式 (2-4) 即为风能的表达式。

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，与气流速度的立方成正比。其中 ρ 和 v 随地理位置、海拔、地形等因素而变化。

3. 风力机气动理论

风轮的作用是将风能转换为机械能。由于流经风轮后的风速不可能为零，因此风所拥有的能量不可能完全被利用，也就是说只有风的一部分能量可以被吸收，成为桨叶的机械能。那么风轮究竟能够吸收多少风能呢？作为风力机的气动理论——贝兹理论讨论了这个问题。

贝兹理论是由德国的贝兹 (Betz) 于 1926 年建立的。他假定风轮是理想的，即没有轮毂，又具有无限多的叶片，气流通过风轮时没有阻力，并假定经过整个风轮扫及面全是均匀的，而且通过风轮前后的速度都为轴向方向。

现研究理想风轮在流动的大气中的情况，如图 2-4 所示，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。

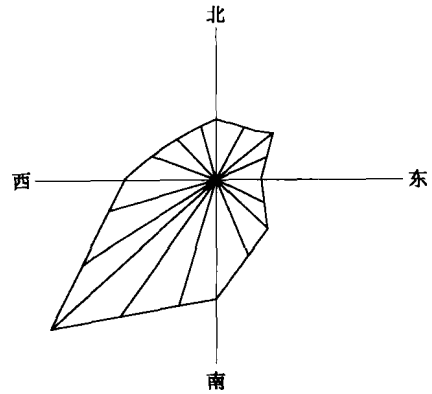


图 2-3 风能玫瑰图

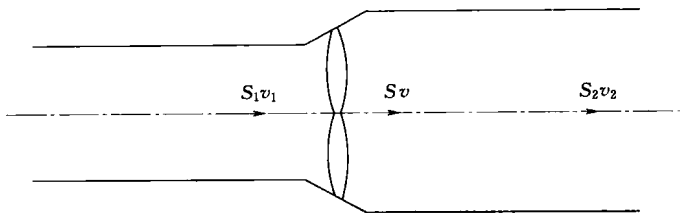


图 2-4 风轮气流图

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

$$S_1 v_1 = S v = S_2 v_2 \quad (2-5)$$

风作用在风轮上的力可由 Euler 理论写出

$$F = \rho S v (v_1 - v_2) \quad (2-6)$$

故风轮吸收的功率为

$$P = F v = \rho S v^2 (v_1 - v_2) \quad (2-7)$$

此功率是由动能转换而来的。从上游至下游动能的变化为

$$\Delta E = \frac{1}{2} \rho S v (v_1^2 - v_2^2) \quad (2-8)$$

令式 (2-7) 与式 (2-8) 相等，得到

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2-9)$$

作用在风轮上的力和提供的功率可写为

$$F = \frac{1}{2} \rho S v (v_1^2 - v_2^2) \quad (2-10)$$

$$P = \frac{1}{4} \rho S v (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \quad (2-11)$$

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 (2-11) 微分得

$$\frac{dP}{dv_2} = \frac{1}{4} \rho S v (v_1^2 - 2v_1 v_2 - 3v_2^2) \quad (2-12)$$

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。

把②代入 P 的表达式，得到最大功率为

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho S v_1^3 \quad (2-13)$$

将式(2-13)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)为

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\max}}{\frac{1}{2}\rho v_1^3 S} = \frac{\left(\frac{8}{27}\right)\rho v_1^3 S}{\frac{1}{2}\rho v_1^3 S} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (2-14)$$

式(2-14)即为著名的贝兹理论极限值。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

$$P_s = \frac{1}{2}\rho v_1^3 S C_P \quad (2-15)$$

对于每平方米扫风面积则有

$$P = \frac{1}{2}\rho v_1^3 C_P \quad (2-16)$$

4. 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,由式(2-15)知

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho v^3 S} \quad (2-17)$$

式中 P ——风力机实际获得的轴功率, W;

ρ ——空气密度, kg/m³;

S ——风轮的扫风面积, m²;

v ——上游风速, m/s。

(2) 叶尖速比。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

$$\lambda = \frac{2\pi R n}{v} = \frac{\omega R}{v} \quad (2-18)$$

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) 转矩系数 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