国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”“十三五”国家重点图书出版规划项目

新能源发电并网技术丛书

Grid Connection Technology of PMSG Wind Power Generation System

荣飞　黄守道　高剑　何静　著

直驱永磁风力发电系统并网技术

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

“十三五”国家重点图书出版规划项目

新能源发电并网技术丛书

荣飞　黄守道　高剑　何静　著

直驱永磁风力发电系统并网技术



武汉理工大学 藏書 图書馆

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书为《新能源发电并网技术丛书》之一，是作者所在研究团队近10年从事直驱永磁风力发电系统并网技术的科研成果。本书主要内容包括直驱永磁风力发电系统主电路参数设计、控制系统电路设计和控制系统软件设计，直驱永磁风力发电系统最大功率追踪技术、电网平衡和电网故障下直驱永磁风力发电系统双PWM变流器并网技术、大功率直驱永磁风力发电系统并联双PWM变流器及其环流控制技术、基于Z源变流器风力发电并网技术、基于直驱永磁风力发电系统的风电场并网技术。

本书可作为从事风力发电变流系统、Z源变流器，特别是基于直驱永磁风力发电系统并网系统的研发人员、生产人员和管理人员、技术人员的参考用书，同时也可作为高等院校相关专业的教材。

图书在版编目（CIP）数据

直驱永磁风力发电系统并网技术 / 荣飞等著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2018.12
（新能源发电并网技术丛书）
ISBN 978-7-5170-7272-0

Ⅰ. ①直… Ⅱ. ①荣… Ⅲ. ①永磁发电机－风力发电系统－研究 Ⅳ. ①TM313

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第296259号

书　　名	新能源发电并网技术丛书 **直驱永磁风力发电系统并网技术** ZHIQU YONGCI FENGLI FADIAN XITONG BINGWANG JISHU
作　　者	荣飞　黄守道　高剑　何静　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、68545874 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	184mm×260mm　16开本　12.75印张　279千字
版　　次	2018年12月第1版　2018年12月第1次印刷
定　　价	**49.00**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

丛书编委会

主　任　丁　杰

副主任　朱凌志　吴福保

委　员（按姓氏拼音排序）

陈　宁　崔　方　赫卫国　秦筱迪

陶以彬　许晓慧　杨　波　叶季蕾

张军军　周　海　周邺飞

序
XU

随着全球应对气候变化呼声的日益高涨以及能源短缺、能源供应安全形势的日趋严峻，风能、太阳能、生物质能、海洋能等新能源以其清洁、安全、可再生的特点，在各国能源战略中的地位不断提高。其中风能、太阳能相对而言成本较低、技术较成熟、可靠性较高，近年来发展迅猛，并开始在能源供应中发挥重要作用。我国于2006年颁布了《中华人民共和国可再生能源法》，政府部门通过特许权招标，制定风电、光伏分区上网电价，出台光伏电价补贴机制等一系列措施，逐步建立了支持新能源开发利用的补贴和政策体系。至此，我国风电进入快速发展阶段，连续5年实现增长率超100%，并于2012年6月装机容量超过美国，成为世界第一风电大国。截至2014年年底，全国光伏发电装机容量达到2805万kW，成为仅次于德国的世界光伏装机第二大国。

根据国家规划，我国风电装机容量2020年将达到2亿kW。华北、东北、西北等“三北”地区以及江苏、山东沿海地区的风电主要以大规模集中开发为主，装机规模约占全国风电开发规模的70%，将建成9个千万千瓦级风电基地；中部地区则以分散式开发为主。光伏发电装机容量预计2020年将达到1亿kW。与风电开发不同，我国光伏发电呈现“大规模开发，集中远距离输送”与“分散式开发，就地利用”并举的模式，太阳能资源丰富的西北、华北等地区适宜建设大型地面光伏电站，中东部发达地区则以分布式建筑光伏为主，我国新能源在未来一段时间仍将保持快速发展的态势。

然而，在快速发展的同时，我国新能源也遇到了一系列亟待解决的问题，其中新能源的并网问题已经成为了社会各界关注的焦点，如新能源并网接入问题、包含大规模新能源的系统安全稳定问题、新能源的消纳问题以及新能源分布式并网带来的配电网技术和管理问题等。

新能源并网技术已经得到了国家、地方、行业、企业以及全社会的广泛关注。自“十一五”以来，国家科技部在新能源并网技术方面设立了多个“973”“863”以及科技支撑计划等重大科技项目，行业中诸多企业也在新能

源并网技术方面开展了大量研究和实践，在新能源并网技术方面取得了丰硕的成果，有力地促进了新能源发电产业的发展。

中国电力科学研究院作为国家电网公司直属科研单位，在新能源并网等方面主持和参与了多项国家“973”“863”以及科技支撑计划和国家电网公司科技项目，开展了大量与生产实践相关的针对性研究，主要涉及新能源并网的建模、仿真、分析、规划等基础理论和方法，新能源并网的实验、检测、评估、验证及装备研制等方面的技术研究和相关标准制定，风电、光伏发电功率预测及资源评估等气象技术研发应用，新能源并网的智能控制和调度运行技术研发应用，分布式电源、微电网以及储能的系统集成及运行控制技术研发应用等。这些研发所形成的科研成果与现场应用，在我国新能源发电产业高速发展中起到了重要的作用。

本次编著的《新能源发电并网技术丛书》内容包括电力系统储能应用技术、风力发电和光伏发电预测技术、新能源发电建模与仿真技术、光伏发电并网试验检测技术、微电网运行与控制、数值天气预报产品在新能源功率预测中的应用、光伏发电认证及实证技术、新能源发电建模与仿真技术、新能源调度技术与并网管理、分布式电源并网运行控制技术、电力电子技术在智能配电网中的应用、新能源功率预测等多个方面。该丛书是中国电力科学研究院在新能源发电并网领域的探索、实践以及在大量现场应用基础上的总结，是我国首套从多个角度系统化阐述大规模及分布式新能源并网技术研究与实践的著作。希望该丛书的出版，能够吸引更多国内外专家、学者以及有志从事新能源行业的专业人士，进一步深化开展新能源并网技术的研究及应用，为促进我国新能源发电产业的技术进步发挥更大的作用！

中国科学院院士、中国电力科学研究院名誉院长



前言
QIANYAN

风力发电是我国战略性新兴产业，大力发展风电是应对气候变化、实现清洁能源替代、促进节能减排、保障能源安全的必由之路，是我国抢占新一轮全球能源变革和经济科技竞争制高点的重要举措。近年来，我国风电发展迅速，风电年均装机速度已远超世界平均水平。

风力发电机组主要包含双馈风力发电机组和直驱永磁风力发电机组。直驱永磁风力发电系统采用低速多极永磁风力发电机，全功率背靠背双PWM变流器，永磁体励磁，无需齿轮箱，具有高效率、高功率密度、高可靠性等优点，已成为当前风电技术领域的重要发展方向与研究热点。

为促进基于直驱永磁风力发电系统并网技术的发展，本书将湖南大学风力发电研究团队近十年从事直驱永磁风力发电系统并网技术的科研成果进行整理和总结。期望本书的出版能对我国基于直驱永磁风力发电系统并网技术的进一步发展做出贡献。

本书共分7章，主要对直驱永磁风力发电系统的组成与设计、直驱永磁风力发电系统最大功率追踪技术、直驱永磁风力发电系统双PWM变流器并网技术、大功率直驱永磁风力发电系统并联双PWM变流器及其环流控制技术、基于Z源变流器风力发电并网技术、基于直驱永磁风力发电系统的风电场并网技术进行研究和探讨。本书可作为从事风力发电变流系统、Z源变流器，特别是基于直驱永磁风力发电系统并网系统的研发人员、生产人员和管理人员、技术人员的参考用书，同时也可作为高等院校相关专业的教材。

本书由湖南大学风力发电团队荣飞副教授、黄守道教授、高剑副教授和湖南工业大学何静教授共同撰写。王辉教授、罗德荣副教授、黄科元副教授、肖磊博士、邓秋玲博士和张阳博士等对本书中的研究成果做出了重要

贡献。

本书相关的基础研究工作获得了国家自然科学基金、国际科技合作专项和湖南省科技重大专项等项目的支持，本书在撰写过程中得到了湘电集团有限公司的大力支持，在此一并表示感谢。

由于时间和水平有限，对于本书中存在的错误和不妥之处，恳请广大读者不吝指正。

作者

2018 年 8 月

目 录

MULU

序

前言

第1章 绪论 …… 1

1.1 风力发电基本原理 …… 1

1.2 风轮建模 …… 1

1.3 风轮功率控制 …… 5

1.4 风电机组功率控制策略 …… 7

参考文献 …… 11

第2章 直驱永磁风力发电系统的组成与设计 …… 12

2.1 直驱永磁风力发电系统的构成与运行原理 …… 12

2.2 直驱永磁风力发电系统参数设计 …… 13

2.3 直驱永磁风力发电机变流系统控制电路设计 …… 19

2.4 控制系统软件的设计与实现 …… 24

参考文献 …… 30

第3章 直驱永磁风力发电系统最大功率追踪技术 …… 31

3.1 风力发电系统最大功率控制策略 …… 31

3.2 新型爬山算法及其控制策略 …… 37

3.3 直驱永磁风电机组的控制 …… 45

3.4 风力发电系统最大功率控制仿真 …… 47

参考文献 …… 61

第4章 直驱永磁风力发电系统双 PWM 变流器并网技术 …… 62

4.1 直驱永磁风力发电系统控制策略 …… 62

4.2 电网故障下直驱永磁风力发电系统的控制策略 …… 82

4.3 实验研究 …… 94

参考文献 …… 100

第 5 章　大功率直驱永磁风力发电系统并联双 PWM 变流器及其环流控制技术 …… 101
5.1　大功率直驱永磁风力发电系统并联双 PWM 变流器结构与模型 …… 101
5.2　2MW 直驱永磁风力发电机并联变流器环流及控制 …… 108
5.3　仿真与实验 …… 117
参考文献 …… 124
第 6 章　基于 Z 源变流器风力发电并网技术 …… 125
6.1　基于 Z 源变流器的风力发电系统结构及原理 …… 125
6.2　基于 Z 源变流器的风力发电系统直通零矢量控制策略 …… 133
6.3　基于 Z 源变流器的无差拍并网控制策略 …… 134
6.4　基于 Z 源变流器的风力发电系统不对称故障穿越策略 …… 139
参考文献 …… 155
第 7 章　基于直驱永磁风力发电系统的风电场并网技术 …… 157
7.1　风电场并网同步技术 …… 157
7.2　基于 PR 控制的直驱永磁风电系统并网策略 …… 176
7.3　基于虚拟功率 VF 下垂控制的直驱永磁风力发电系统并网策略 …… 181
参考文献 …… 191

第1章 绪 论

1.1 风力发电基本原理

典型风能转换系统原理如图1-1所示。风吹动叶片使风轮旋转，将风能转换为机械能，叶轮带动发电机旋转，发电机再将机械能转化为电能，然后再通过功率变流器将电能变换成与电网同步的电压和频率后送入电网或通过变流器给蓄电池充电，最后利用蓄电池给负载供电；也可以通过一个可控的整流调节器，使风力发电机同时给负载和蓄电池供电。根据风轮旋转轴位置的不同，可分为垂直轴风轮和水平轴风轮两种。并网型风力发电系统的风轮一般为水平轴式，因为它能增强风塔的稳定性、减小或消除垂直轴向系统造成的风塔震荡现象。水平轴式风力机在其桨叶正对风向时才能旋转，因此，由偏航系统根据风向来控制风轮迎风角。

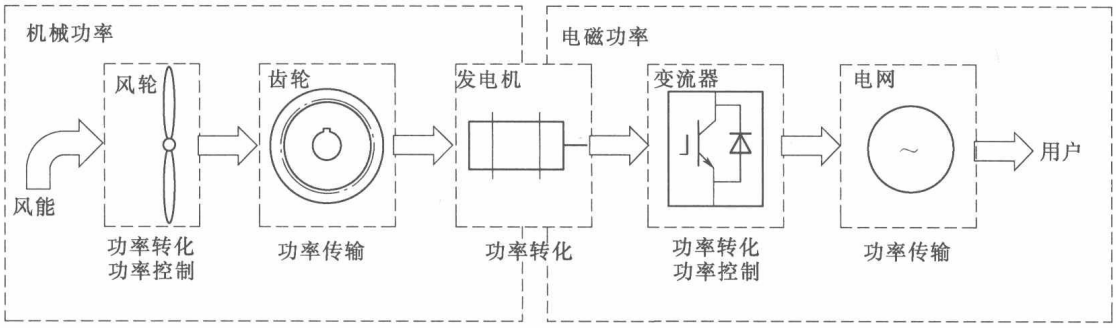


图1-1 风能转换系统原理图

由图1-1可以看出，现代化的风力发电系统，已不只是一台风轮和一台发电机的简单组合，而是一个高度集成了空气动力学、电机学、电力电子技术、电力系统分析、继电保护技术、先进控制技术和数据通信等各方面知识为一体的复杂的机电能量转换系统。

1.2 风轮建模

1.2.1 风能的计算

由流体力学可知，单位体积气流所含能量可以表示为

$$E=\frac{1}{2}mv^2 \tag{1-1}$$

式中　m——气体的质量；

v——气体的速度。

则穿过横截面积为 S 的气体体积 V 可以表示为

$$V = Sv \tag{1-2}$$

设空气密度为 ρ，则该空气的质量可表示为

$$m = \rho V = \rho Sv \tag{1-3}$$

则速度为 v 的风，在经过横截面积为 S 处的风能表达为

$$E = \frac{1}{2}\rho Sv^3 \tag{1-4}$$

从能量转换的角度来看，风力发电的原理是通过风轮将风能转换为机械能，再通过发电机将机械能转化为电能。1926 年，德国物理学家 Albert Betz 提出了第一个气动理论——Betz 基础动量理论。Albert Betz 假定风轮是理想的，即它没有轮毂，具有无限多叶片，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。

如图 1-2 所示，由功的定义可知，风能的机械能仅由空气的动能降低所致，因此 $v_1 > v_2$，$S_1 < S_2$，假设气流是不可压缩而且连续的，故有 $S_1 v_1 = Sv = S_2 v_2$。

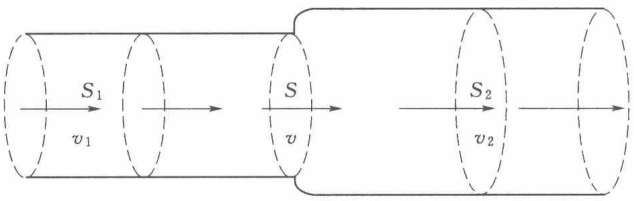


图 1-2　风轮的气流图

v_1—还未流经风轮叶片时的实际风速度；v—风流经风轮叶片的实际速度；

v_2—已经流经过风轮叶片时的风速；S—风轮叶片的面积；

S_1—对应 v_1 的横截面积；S_2—对应 v_2 的横截面积

由欧拉定理，风作用在风轮上的力可以表示为

$$F = \rho Sv(v_1 - v_2) \tag{1-5}$$

则风轮吸收的功率为

$$P = Fv = \rho Sv^2(v_1 - v_2) \tag{1-6}$$

风轮吸收的功率是由动能转换而来的，从上游至下游动能的变化为

$$\Delta E = \frac{1}{2}\rho Sv(v_1^2 - v_2^2) \tag{1-7}$$

由于 $P = \Delta E$，则可得到

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \tag{1-8}$$

将式（1-8）分别代入式（1-5）和式（1-6），则可以得到作用在风轮上的力 F，以及风轮吸收的功率 P 为

$$\begin{cases} F = \dfrac{1}{2}\rho S(v_1^2 - v_2^2) \\ P = \dfrac{1}{4}\rho S(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2) \end{cases} \tag{1-9}$$

对于给定的风速 v_1，以 v_2 为变量，将式（1-9）对 v_2 微分可得

$$\frac{dP}{dv_2} = \frac{1}{4}\rho S(v_1^2 - 2v_1v_2 - 3v_2^2) \tag{1-10}$$

令式（1-10）等于 0，可得到两个解：$v_2 = v_1/3$，对应于最大功率；$v_2 = -v_1$，没有物理意义。将 $v_2 = v_1/3$ 代入功率 P 的表达式（1-9），则可得最大功率表达式为

$$P_{max} = \frac{8}{27}\rho S v_1^3 \tag{1-11}$$

将式（1-11）除以气流通过扫掠面 S 时风所具有的动能 E，可以得到风轮的理论最大风能利用系数，即

$$C_{Pmax} = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2}\rho v_1^3 S} = \frac{8\rho S v_1^3/27}{\rho S v_1^3/2} \approx 0.593 \tag{1-12}$$

式（1-12）即为著名的贝茨理论的风能利用极限值。从式（1-12）可以看出，风轮所获取的风能是有限的，就算能量无损失且空气流是理想的，风能利用效率也只能达到 0.593。在实际中，能量转换因发电机和风轮的不同而有差异，由于能量的转换将导致功率下降，风轮的实际风能利用系数远达不到 0.593，基本为 0.2～0.5。

1.2.2 风轮的特性系数

风轮的特性系数主要有风能利用系数 C_P、叶尖速比 λ、转矩系数 C_T。

1. 风能利用系数 C_P

风能利用系数可以衡量风轮从风能中捕获能量的多少，它的数学表达式为

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

式中 P——实际捕获得的功率，W；

ρ——空气密度，kg/m³；

v——风速，m/s。

S——风穿越面积。

C_P 值越大，说明风轮吸收的风能越大，效率就越高。风能利用系数 C_P 是桨距角 β 和叶尖速比 λ 表示的函数，彼此关系如图 1-3 所示。

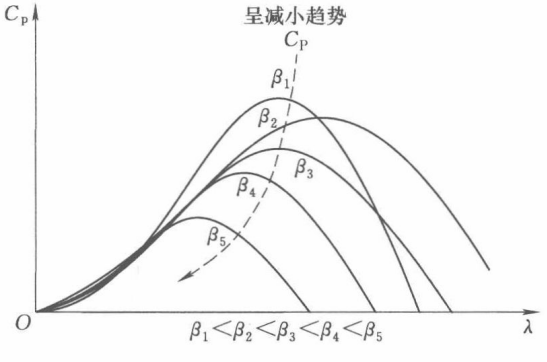


图 1-3 风轮的风能利用系数与叶尖速比和桨距角之间的关系曲线图

从图 1-3 中可得出两个结论：①对于任意 λ，桨距角 $\beta=0°$ 时，对应的 C_P 为最大值，并随着桨距角 β 的增大而减小；②对于一个确定的 β，此时存在唯一的最佳叶尖速比 λ_{opt}，对应的风能利用系数记为 C_{Pmax}，此时系统转换效率最高。

2. 叶尖速比 λ

风轮在不同风速下的状态用叶尖速比描述。叶尖速比为叶片的叶尖线速度与风速之比，即

$$\lambda=\frac{2\pi Rn}{v}=\frac{\omega R}{v} \tag{1-14}$$

式中　n——风轮的转速，r/s；

ω——风轮的角频率，rad/s；

R——风轮叶片的半径。

3. 转矩系数 C_T

风能利用系数 C_P 与叶尖速比 λ 之比称为转矩系数，即

$$C_T=\frac{C_P}{\lambda}=\frac{T}{\frac{1}{2}\rho v^2 SR} \tag{1-15}$$

式中　T——风轮转矩。

1.2.3　最大风能捕获原理

由式（1-14）可知，叶尖速比 λ 与风速、风轮的转速有关，相同的风速下，不同的风轮转速会得到不同的叶尖速比，从而得到不同的风能利用系数 C_P，风轮输出不同的功率 P。若想获得最大风能利用系数 C_{Pmax}，追踪最佳功率曲线，必须在风速变化时实时控制风轮的转速 ω，保持最佳叶尖速比 λ_{opt}。

风轮的功率 P 可用风轮转矩 T 和转速 ω 来表示，即

$$\begin{cases} P=T\omega \\ T=\dfrac{1}{2}\rho\pi v^2 R^3 C_T(\lambda) \end{cases} \tag{1-16}$$

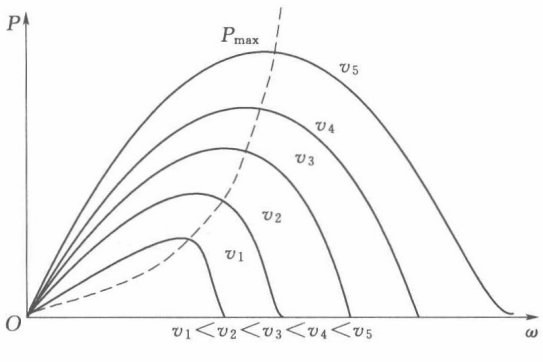


图 1-4　风轮功率特性曲线

由式（1-16）可以得出，风轮的最大功率 P 和转矩 T 分别与转速 ω 的三次方和二次方成正比例关系，实质上风轮的功率曲线与转矩曲线是一致的，只是体现的角度不同而已。风轮功率特性曲线如图 1-4 所示。



1.3 风轮功率控制

1.3.1 定桨距风轮与变桨距风轮

所谓定桨距风轮，就是叶片安装好后安装角不再发生变化。定桨距风轮一般设计有可控的叶尖扰流器，可旋转 90°形成阻尼板，当风电机组需要脱网时可使机组制动。失速型定桨距风轮的整体结构简单、部件少、造价低，并具有较高的安全系数，利于市场竞争。但失速型叶片成型工艺较复杂，叶片的失速特性不好控制，不利于向大机组发展。

变桨距风轮是为了适应不同的风速，使其在不同风速下都有较高的功率系数而设计的。根据风轮的功率特性，如果在某一风速下有较高的功率系数，则在其他风速下功率系数会下降。如果随着风速的变化，调节整个桨叶的安装角，则有可能在较大的风速范围内都可以获得较高的功率系数，从而可以获得最大功率输出。

变桨距型风轮能使叶片的安装角随风速变化而变化，从而使风轮在各种工况下（启动、正常运转、停机）按最佳参数运行。它可以使发电机在额定风速以下的工作区间输出较大的功率，而在额定风速以上高风速区间不超载，因此发电机不需要大的过载能力。它的缺点是需要有一套比较复杂的变桨距调节结构。

1.3.2 风轮功率控制方式

为了避免高风速对风轮带来的损害，可以采用不同的控制方法控制作用在风轮上的气动转矩和限制风轮的输出功率。对风轮输出功率的控制方法有失速控制（被动控制）、变桨距控制（主动控制）和主动失速控制。

1.3.2.1 失速控制

失速控制是最常用的控制方法，叶片以一个固定的角度安装在轮毂的轴上。因此在额定风速下，风轮的效率较低。而当风速超过额定风速时，桨叶依赖于叶片独特的翼型结构，使流过叶片的气流产生紊流而降低叶片的利用效率，自动将功率限制在额定值附近，使转子失去一部分功率，因此这种控制方式称为失速控制。气动功率调整的速度比较慢，比快速桨距功率调整引起的功率波动小。这种控制方式的缺点是在低风速下效率低，无辅助启动，在空气密度和电网频率发生变化时，最大静态功率发生变化。失速控制的过程很复杂，特别是风速不稳定时的精确计算很困难，所以只在兆瓦级以下的风机中得到应用。

1.3.2.2 变桨距控制

变桨距控制的原理是气流对叶片的攻角可随着风速的变化而进行调整，从而改变风

电机组从风中获得的机械能。这种控制方法的优点是可以对功率进行很好的控制，并可以辅助启动和紧急刹车。从发电效率来看，优良的功率控制意味着在高风速下输出功率的平均值总是接近发电机的额定功率。而变桨距控制可以调节桨叶桨距角，使输出功率保持稳定。该控制方式的缺点是由于存在桨距机构，结构复杂，在高风速下功率波动较大。由于阵风和桨距机构下的限速，瞬时功率将会在平均额定功率附近发生波动。

1.3.2.3 主动失速控制

主动失速控制是失速控制和变桨距控制的结合，它在低风速下和高风速下都可以对输出功率进行控制。在低风速下，将桨距角调节到最佳桨距角以获得更高的气动效率；在高风速下，风力机按照与低风速时变桨距调节的相反方向来调节桨距角。这种主动失速控制的实质是叶片攻角发生了变化，从而引起更深层次的失速。主动失速控制的风力机可以获得平滑的、有限的功率，不会像变桨距控制风力机那样产生大的功率波动。这种控制方式的优点是能够补偿空气密度的变化，容易启动并容易实现紧急刹车。

主动失速控制风轮在原理上是一个具有变桨距机构的失速控制风轮。失速控制风轮和主动失速控制风轮的区别在于后者有一个可以控制失速效果的变桨距角触动系统；另外，功率系数可以在某个范围内进行优化。当风速在启动风速和额定风速之间时，桨距角按最佳输出功率调节到最佳位置；当风速超过额定风速时，通过利用失速效果将输出功率限制在额定功率。为了获得平坦的功率曲线，即在额定风速到切出风速之间得到恒定的额定功率，必须相应地对桨距角进行调节。主动失速控制风轮的运行模式有功率优化和功率限制两种。

1. 功率优化

当风速低于额定风速且输出功率低于额定功率时，对风轮输出功率进行控制的目标是实现最大功率点跟踪以捕获最大风能。通过在给定的风速下求出对应于最佳功率系数C_{Pmax}的桨距角，同时当风速变化时改变风轮的转速来改变叶尖速比来对功率进行优化。由于风速是在某一个时间范围内的平均值，因此对桨距角进行调节只能获得平均风速时的最大功率系数。功率优化是一个开环控制，不需要来自桨距角和功率对风速的反馈量，控制简单。

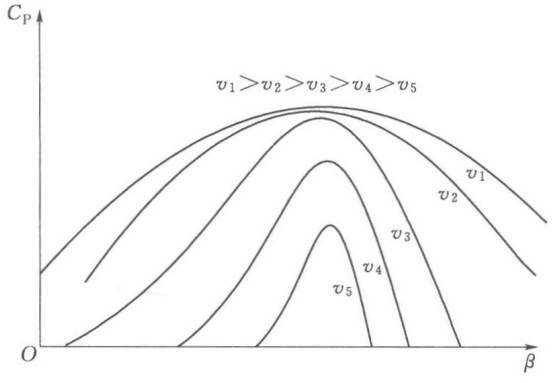


图1-5 在不同风速下风能利用系数C_P与桨距角β的关系曲线

图1-5所示为在不同风速下风能利用系数C_P与桨距角β的关系曲线，可以看出：在低风速时，C_P—β的关系曲线在C_P最大值处相当尖，即C_P对偏离最佳桨距角β的小小的变化都是很敏感的；

在高风速时，曲线在顶部变得平坦些，即风速稍微变化和偏离最佳角对最佳功率系数没有太大的影响。因此，低风速时的最佳桨距角应该精确地求出。

调节桨距角时应该根据平均风速值而不是根据瞬时风速值，因此要使用平均移动法求出平均风速。平均移动法实际上是一个过滤风速信号的方法，此方法常用于风力机控制器中。在风速超过额定风速或功率超过额定功率时，桨距角控制系统才起作用。

2. 功率限制

当输出功率超过额定值，或风速超过额定值时，功率限制模式就起作用。在功率限制模式中，功率控制采用闭环控制，将测量到的发电机平均功率和风力机功率的设定值进行比较，在正常运行时，风轮功率的设定值一般是风轮的额定值。若平均功率超过设定值，桨距角按负方向增加以增加失速效果，因此限制输出功率；若平均功率低于设定值，桨距角按正方向增加以降低失速效果，因此增加输出功率。图 1-6 所示为在额定风速和切出风速范围内获得恒定功率时桨距角的调节。

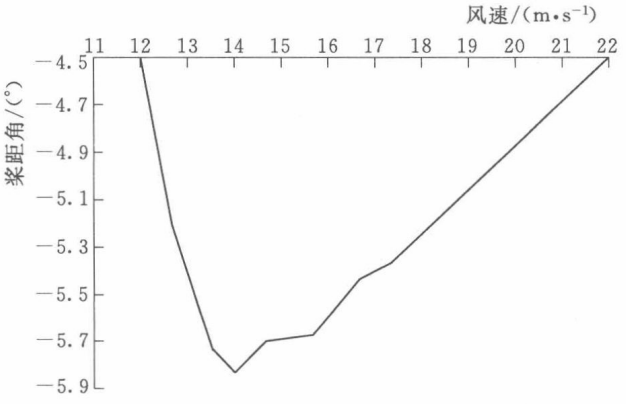


图 1-6 在额定风速到切出风速范围内获得恒定功率时桨距角的调节（2MW）

1.4 风电机组功率控制策略

为了从风中捕获到更多的风能，根据风轮的功率特性，应采取如下控制策略。

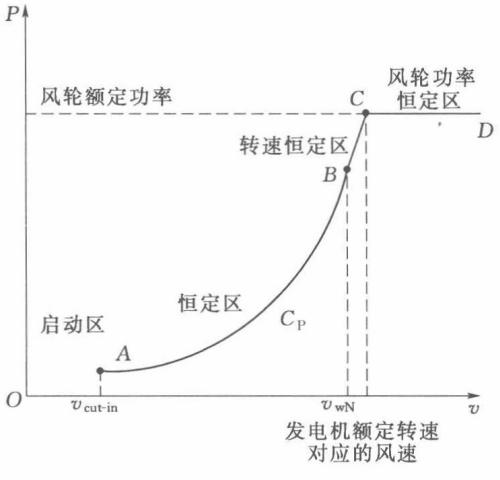


图 1-7 风电机组的运行区域

（1）在风轮切入风速（$v_{cut\text{-}in}$）到风轮的额定转速对应的风速 v_{wN} 之间。根据风轮的功率特性可知，风速太低时，捕获的风能也少，系统的效率也低。因此在风速太低的情况下不宜启动风电机组，只有当风速到达一定值，即切入风速后，才启动风电机组，如图 1-7 所示的 OA 区间。但为了提高整个风力发电系统的利用率，风电机组的切入速度也不宜太高，对直驱永磁风力发电机而言，减小发电机的齿槽转矩可适当降低风电机组的切入速度。风速超过风轮的切入风速时启动风电机组，风轮转速由零增大到发电机的