



国际电气工程先进技术译丛



WILEY
www.wiley.com

风力发电的 模拟与控制

**Wind Energy Generation
Modelling and Control**

Olimpo Anaya-lara
Nick Jenkins
Janaka Ekanayake
Phill Cartwright
Mike Hughes

著

(英)

徐 政 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS





中国电力出版社“十二五”重点图书出版规划项目

中国电力出版社
CHINA ELECTRICITY PRESS

风力发电的 模拟与控制

Wind Turbine Energy Conversion from
Mechanical Energy to Electrical Energy

WIND TURBINE ENERGY
CONVERSION FROM
MECHANICAL ENERGY
TO ELECTRICAL ENERGY

李 强 著

中国电力出版社



国际电气工程先进技术译丛

风力发电的模拟与控制

Olimpo Anaya-lara

Nick Jenkins

(英) Janaka Ekanayake

Phill Cartwright 著

Mike Hughes

徐 政 译



机械工业出版社

本书主要讲述了大型风电机组中发电机和电力电子系统的基本原理和模拟方法,并讨论了风电机组与电力系统之间的相互作用及其对电力系统运行和稳定性的影响。本书适合于从事风力发电设备开发、风电场接入系统设计和电力系统运行的工程师以及高等学校电气工程专业的教师和研究生阅读。

Wind Energy Generation Modelling and Control

ISBN: 978-0-470-71433-1

All Right Reserved、Authorised translation from the English language edition published by John Wiley&Sons, Ltd.

This translation Published under license.

Original English Language edition Copyright © 2009 by John Wiley&Sons, Ltd.

Simplified Chinese Translation Copyright © 2010 by China Machine Press

本书简体中文版由机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有,翻印必究。

本书版权登记号:01-2010-1035.

图书在版编目(CIP)数据

风力发电的模拟与控制/(英)阿纳亚-劳拉(Anaya-lara, O.)等著;
徐政译. —北京:机械工业出版社,2010.12

(国际电气工程先进技术译丛)

Wind Energy Generation Modelling and Control

ISBN 978-7-111-32494-2

I. ①风… II. ①阿…②徐… 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221449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:张俊红 责任编辑:韩 静

版式设计:霍永明 责任校对:肖 琳

封面设计:马精明 责任印制:杨 曦

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2011年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·13印张·249千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-32494-2

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

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

译 者 序

全球气候变化和能源供应安全是当今世界面临的两大挑战，大力开发可再生能源是应对这两大挑战的重要途径。风力发电是目前主要的可大规模商业化应用的可再生能源，我国的风电装机容量及风电设备制造业规模在世界上都已名列前茅，但就风力发电的技术水平而言，不管是在风电设备的制造方面还是在风电场接入系统后的运行方面，我国与世界先进水平都还有相当大的差距。关于风力发电的模拟和控制问题，世界上这方面的著作并不多，中文著作就更加少见。本书由英国的5位作者共同编写而成，于2009年由 John Wiley & Sons 出版社出版，希望本书的翻译能对我国掌握风电设备制造的核心技术以及大规模风电场与电网的协调运行有所帮助。

本书翻译过程中，徐琼璟同学做了大量工作，在此深表谢意。原书中一些明显的笔误或印刷错误，改正以后并未加以说明。限于译者水平，书中难免存在错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。译者联系方式：电话（0571）87952074，电子信箱 hvdc@zju.edu.cn。

徐 政
于浙江大学求是园

原 书 前 言

本书的写作受到两个因素的激励：一是世界范围内风力发电系统的快速扩张，二是这种扩张对电力系统运行和控制所产生的影响。风力机技术的快速进步和先进电力电子变流器的广泛应用要求对风力发电系统及其控制器中的各种部件作更仔细和更精确的模拟。由于风力发电技术与基于同步发电机的传统发电厂所采用的技术具有很大的不同，电力网的动态特性可能会发生剧烈的变化，因而对电网控制和运行的要求可能也会不同。此外，新的电网法规关于大型风电场接入电网的条款要求风电场能够像基于同步发电机的传统发电厂那样，支持电网并对电网运行有所贡献。为了应对这些挑战，充分了解风力发电的动态模型、控制能力及与电力系统之间的相互作用就变得非常关键。

本书描述了风力发电系统模拟的基本原理，包括机械系统和电气系统；讨论风力发电系统的控制思路和实现方案，以使风力发电系统能够可靠、安全和经济运行。本书是为想要了解大型风电机组模拟和控制的高年级本科生和研究生以及从事实际工作的工程师和负责风电场接入系统的相关人员而编写的。本书首先综述了常见风力发电系统的运行原理、模拟和控制方法，然后讨论了与电网的兼容性问题以及风电机组对电力系统运行和稳定性的影响。

第1章概述了世界范围内目前风力发电的状态，介绍了常用的风电机组结构。第2章阐述了用于风力发电系统的典型变流器拓扑和脉冲宽度调制控制技术。第3章介绍了同步电机数学模拟的基本原理及其在暂态稳定研究中的表示方法。第4章到第6章阐述了定速风电机组和变速风电机组的数学模拟方法；介绍了典型的控制思路；并通过多个算例展示了这些机组在系统大扰动和小扰动下的动态性能。第7章讨论了传动轴和叶片动态特性的不同表示方法，并解释了结构动态特性是如何影响电气暂态下风电机组的性能的。第8章讨论了大型风电场与传统发电机之间的相互作用及其对电网动态特性的影响；并采用时域仿真响应和特征值分析的方法来建立暂态和动态稳定的基本特性。然后在第9章引出了用于变速风电机组的更加先进的控制方案，例如包含电力系统稳定器。第10章讨论了用于风电场接入系统的使能技术。最后的第11章阐述了在电力系统故障时风电机组的不同控制方法。

本书将不同来源的关于风电机组模拟和控制的资料集合在了一起，例如作者们在英国、美国、斯里兰卡和墨西哥多所大学讲授了多年的研究生课程的教材，大量的由IEEE和IET发表的学术论文，以及笔者们密切参与的研究项目，如由

EPSRC 资助的 SUPERGEN 未来电网技术和由 DECC 资助的 UK SEDG 项目。通过这些项目，作者们有机会与工业界的伙伴（电力公司、电力电子装置制造商和风电场的开发者）进行切磋，并就风电机组的模拟与控制在风能领域的需求与地位达成了一致的观点。在这里感谢 Jim McDonald 教授和 Goran Strbac 教授——UK SEDG 项目的两个主任；感谢 Nolan Caliao 博士和 Piyadanai Pachanapan 先生帮助为本书准备插图；感谢 Gustavo Quinonez-Varela 博士为定速风电机组运行提供输入参数；感谢 Rose King 女士为第 10 章提供了有用的材料；特别感谢 Ramtharan Gnanasambandapillai 博士允许将他的博士论文中的资料放到第 7 章中。

Olimpo Anaya-Lara

Nick Jenkins

Janaka Ekanayake

Phill Cartwright

Mike Hughes

2009

缩略语与物理量符号

AC (Alternating current)	交流
AVR (Automatic voltage regulator)	自动电压调节器
CB-PWM (Carrier-based) PWM	基于载波的脉宽调制
DC (Direct current)	直流
DFIG (Doubly fed induction generator)	双馈感应发电机
Emf (Electromotive force)	电动势
FC (Fixed capacitor)	固定电容器
FMAC (Flux magnitude and angle controller)	磁通幅值和相位角控制器
FRC (Fully rated converter)	全功率变流器
FRC-SG (Fully rated converter wind turbine using synchronous generator)	采用同步发电机的全功率变流器型风电机组
FRT (Fault ride-through)	故障穿越
FSIG (Fixed-speed induction generator)	定速感应发电机
GSC (Generator - side converter)	机侧变流器
HVAC (High-voltage alternating current)	高压交流
HVDC (High-voltage direct current)	高压直流
IGBT (Insulated-gate bipolar transistor)	绝缘栅双极型晶体管
LCC-HVDC (Line-commutated converter HVDC)	电网换相变流器型 HVDC
NRS-PWM (Non-regular sampled PWM)	不规则采样 PWM
NSC (Network-side converter)	网侧变流器
PAM (Pulse amplitude modulation)	脉冲幅值调制
PI (Proportional-integral controller)	比例积分控制器
PLL (Phase-locked loop)	锁相环
PM (Permanent magnet)	永磁体
PoC (Point of connection)	连接点
PPC (Power production control)	功率产出控制
PSS (Power system stabilizer)	电力系统稳定器
pu (Per unit)	标么值
PWM (Pulse-width modulation)	脉冲宽度调制
RMS (Root mean square)	方均根值
RPM (Revolutions per minute)	转/分, r/min
RS-PWM (Regular sampled PWM)	规则采样 PWM
SFO (Stator flux oriented)	定子磁通定向

SFO-PWM (Switching frequency optimal PWM) 开关频率优化 PWM
 SHEM-PWM (Selective harmonic elimination PWM) 特定谐波消除 PWM
 STATCOM (Static compensator) 静止同步补偿器
 SVC (Static var compensator) 静止无功补偿器
 SV-PWM (Space vector PWM) 空间矢量 PWM
 TCR (Thyristor-controlled reactor) 晶闸管控制电抗器
 TSC (Thyristor-switched capacitor) 晶闸管投切电容器
 VSC-HVDC (Voltage source converter HVDC) 电压源变流器型 HVDC

$P_{\text{空气}}$ 气流中的功率

ρ 空气密度

A 风轮扫过的面积

v 上风向自由风速

C_p 功率系数

$P_{\text{风力机}}$ 传递到风力机风轮上的功率

λ 叶尖速度比

ω 风轮的转速

R 风轮的半径

V_m 场点年平均风速

V_{DC} 直流电压

上面一横杠“-” 表示标么值

b 基准值

Φ_s 定子励磁磁通

Φ_r 转子励磁磁通

i_{ds} 、 i_{qs} d 轴和 q 轴上的定子电流

v_{ds} 、 v_{qs} d 轴和 q 轴上的定子电压

ψ_{ds} 、 ψ_{qs} d 轴和 q 轴上的定子磁链

T_e 电磁转矩

T_m 机械转矩

P_e 电功率

P_m 机械功率

Q 无功功率

ω_b 同步转速基准值

ω_s 同步转速

ω_r 风轮转速, 转子转速

J 惯性常量

H 惯性常量的标么值

K 传动轴刚度

f 系统频率

C 电容值

同步发电机

i_f 励磁电流

i_{kd} 、 i_{kq1} 、 i_{kq2} d 轴和 q 轴阻尼绕组电流

L_{lkd} 、 L_{lkq} 阻尼绕组在 d 轴和 q 轴方向的漏电感

L_{md} 、 L_{mq} 在 d 轴和 q 轴方向的互感

L_{lf} 励磁绕组的漏电感

L_{ls} 定子绕组的漏电感

r_s 定子电阻

r_f 转子绕组电阻

r_{kd} 、 r_{kq1} 、 r_{kq2} d 轴和 q 轴阻尼绕组电阻

v_{fd} 励磁电压

v_{kd} 、 v_{kq1} 、 v_{kq2} d 轴和 q 轴阻尼绕组电压

ψ_f 励磁绕组磁链

ψ_{kd} 、 ψ_{kq1} 、 ψ_{kq2} d 轴和 q 轴阻尼绕组磁链

δ_r 转子角

C_s 同步功率系数

C_d 阻尼功率系数

感应发电机

i_{dr} 、 i_{qr} d 轴和 q 轴转子电流

v_{dr} 、 v_{qr} d 轴和 q 轴转子电压

ψ_{dr} 、 ψ_{qr} d 轴和 q 轴转子磁链

L_m 定子绕组和转子绕组间的互感

X_m 励磁电抗

L_r 、 L_s 定子和转子的自感

X_r 、 X_s 定子和转子的电抗

L_{lr} 转子漏感

L_{ls} 定子漏感

r_r 转子电阻

r_s 定子电阻

s 感应发电机的转差率

p 极数

目 录

译者序		
原书前言		
缩略语与物理量符号		
第1章 风力发电	1	
1.1 风电场	2	
1.2 风力发电系统	2	
1.2.1 风力机	3	
1.2.2 风力机的结构	5	
1.3 风电机组与常规发电厂的比较	8	
1.3.1 局部影响	8	
1.3.2 系统范围的影响	9	
1.4 电网法规关于风电接入的 相关规章	11	
参考文献	12	
第2章 风电机组中的电力 电子技术	14	
2.1 用于 FSIG 风电机组的 软起动器	15	
2.2 电压源变流器 (VSC)	17	
2.2.1 两电平 VSC	17	
2.2.2 方波运行	18	
2.2.3 基于载波的 PWM (CB-PWM)	19	
2.2.4 开关频率最优 PWM (SFO-PWM)	21	
2.2.5 规则与不规则采样 PWM (RS-PWM 与 NRS-PWM)	21	
2.2.6 特定谐波消除 PWM (SHEM)	22	
2.2.7 电压空间矢量开关模式 (SV-PWM)	23	
2.2.8 滞环开关模式	24	
2.3 VSC 在变速系统中的应用	25	
2.3.1 采用二极管桥的 VSC	25	
2.3.2 背靠背 VSC	26	
参考文献	28	
第3章 同步发电机的模拟	29	
3.1 同步发电机的结构	29	
3.2 同步发电机的气隙磁场	29	
3.3 同步发电机的线圈表示	31	
3.4 dq 坐标系下的发电机方程	33	
3.5 稳态运行	35	
3.6 具有阻尼绕组的同步发电机	36	
3.7 非降阶模型	38	
3.8 降阶模型	39	
3.9 大型同步发电机的控制	39	
3.9.1 励磁控制	40	
3.9.2 原动机控制	41	
参考文献	42	
第4章 基于定速感应发电机 (FSIG) 的风电机组	43	
4.1 感应电机结构	43	
4.1.1 笼型转子	43	
4.1.2 绕线转子	44	
4.2 稳态特性	44	
4.3 用于风力发电的 FSIG 结构	46	
4.3.1 双速运行方式	47	
4.3.2 可变转差率运行	47	
4.3.3 无功补偿设备	48	
4.4 感应电机的模拟	49	
4.4.1 FSIG 的一个暂态电抗后的 电势模型	49	
4.5 FSIG 风电机组的动态性能	53	
4.5.1 小扰动	53	

4.5.2 电网故障期间的性能	55	7.2 三质块模型的推导	93
参考文献	57	7.3 等效两质块模型	96
第5章 基于双馈感应发电机		7.4 FSIG 和 DFIG 风电机组性能	
(DFIG) 的风电机组	59	的评估	98
5.1 DFIG 的典型结构	59	参考文献	100
5.2 稳态特性	59	第8章 风电场对电网动态	
5.2.1 稳态下的有功功率关系	61	性能的影响	102
5.2.2 运行状态矢量图	62	8.1 动态稳定性及其评估	102
5.3 最优风功率捕获控制	63	8.2 同步发电机的动态特性	103
5.4 DFIG 的控制方案	64	8.3 同步发电机的同步功率和	
5.4.1 电流模式控制 ($PVdq$)	64	阻尼功率模型	103
5.4.2 转子磁链幅值和相角控制	68	8.4 自动电压调节器对阻尼	
5.5 动态性能评估	69	的影响	105
5.5.1 小干扰	69	8.5 发电机运行状态对阻尼	
5.5.2 电网故障时的性能	72	的影响	106
参考文献	74	8.6 调速器对发电机运行的影响	108
第6章 基于全功率变流器		8.7 暂态稳定性	109
(FRC) 的风电机组	75	8.8 电压稳定性	110
6.1 基于同步发电机的 FRC 风		8.9 通用测试系统	112
电机组	75	8.10 发电机类型对电网动态	
6.1.1 直驱式风电机组的		稳定性的影响	113
发电机	75	8.10.1 发电机 2 为同步发电机	113
6.1.2 永磁同步发电机与电励磁		8.10.2 发电机 2 为基于 FSIG	
同步发电机	76	的风电场	114
6.1.3 永磁同步发电机	76	8.10.3 发电机 2 为基于 DFIG 的风电	
6.1.4 风电机组控制和动态		场 ($PVdq$ 控制)	114
性能评估	77	8.10.4 发电机 2 为基于 DFIG 的风电	
6.2 基于感应发电机的 FRC 型		场 (FMAC 控制)	114
风电机组	86	8.10.5 发电机 2 为基于 FRC 的	
6.2.1 稳态性能	86	风电场	114
6.2.2 FRC-IG 风电机组的控制	87	8.11 风电场与系统的动态	
6.2.3 FRC-IG 风电机组的		相互作用	115
性能特性	90	8.11.1 FSIG 对系统阻尼的影响	115
参考文献	90	8.11.2 DFIG 对系统阻尼的影响	118
第7章 风轮动态性能对风电机组		8.12 风力发电对系统暂态性能	
运行的影响	92	的影响	121
7.1 叶片的弯曲动态	92	8.12.1 发电机 2 为同步	
		发电机	121

VIII 风力发电的模拟与控制

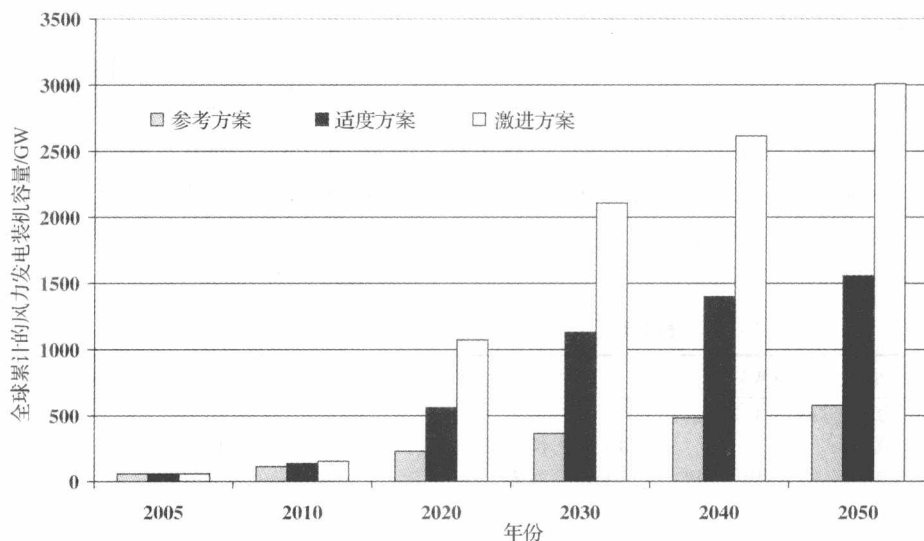
8.12.2 发电机2为FSIG 风电场	122	10.3.1 LCC-HVDC	151
8.12.3 发电机2为DFIG 风电场	122	10.3.2 VSC-HVDC	151
8.12.4 发电机2为FRC 风电场	123	10.3.3 多端HVDC	152
参考文献	124	10.3.4 高压直流输电——机会和 挑战	153
第9章 电力系统稳定器与风电场的 系统阻尼能力	125	10.4 海底电网设计实例	155
9.1 用于同步发电机的电力系统 稳定器	125	10.4.1 Beatrice 海上风电场	155
9.1.1 要求和功能	125	10.4.2 陆上网连接点	156
9.1.2 同步发电机的PSS及对发电机 性能的影响	126	10.4.3 技术分析	158
9.2 用于DFIG的电力系统稳定器	129	10.4.4 成本分析	160
9.2.1 要求和功能	129	10.4.5 推荐的连接点	160
9.2.2 DFIG-PSS及其对性能 的影响	134	参考文献	161
9.3 用于FRC风电场的电力系统 稳定器	137	第11章 应对系统故障的风电机 组控制	164
9.3.1 要求和功能	137	11.1 风电机组对频率调节的影响	164
9.3.2 FRC-PSS及其对性能 的影响	139	11.1.1 频率控制	164
参考文献	144	11.1.2 风电机组的转动惯量	165
第10章 风电场接入电力系统	145	11.1.3 快速一次响应	166
10.1 无功补偿	145	11.1.4 慢速一次响应	168
10.1.1 静止无功补偿器(SVC)	145	11.2 故障穿越(FRT)	172
10.1.2 静止同步补偿器 (STATCOM)	147	11.2.1 FSIG机组	172
10.1.3 STATCOM与FSIG的 稳定性	148	11.2.2 DFIG机组	173
10.2 高压交流接入	149	11.2.3 FRC机组	175
10.3 高压直流接入	150	11.2.4 VSC-HVDC用于连接 FSIG风电场	176
		11.2.5 VSC-HVDC用于连接 FRC风电场	177
		参考文献	179
		附录	181
		附录A 状态空间概念和模型	181
		附录B 特征值与特征矢量概论	186
		附录C 状态方程的线性化	190
		附录D 通用测试系统模型的参数	192

第1章 风力发电

当前,普遍认为,化石燃料的燃烧正在对全球气候产生巨大影响。而有效缓解气候变化需要大大减少温室气体的排放,就拿英国来说,估计到2050年需要减少60%~80%的排放(UK HM Treasury, 2006)。电力系统相比于其他国民经济行业,例如地面和空中运输以及家庭取暖,被认为是比较容易转向低碳能源的。因此,除了在需求侧采取措施外,使用划算和可靠的低碳发电资源,在很多国家已成为能源政策的一个重要目标(EWEA, 2006; AWEA, 2007)。

在过去的几年中,国家政策的制定者出于对气候变化、能源供应的多样性和安全性方面的考虑,对风力发电进行了政策上的鼓励,使得风能发电在所有发电形式中呈现出了最快的增长速度。

图1-1展示了全球累计的风力发电装机容量(GWEC, 2006)。此图中,参考方案是基于国际能源署(IEA)2004年《世界能源展望》报告中的预测数据



全球累计风电装机容量/GW和发电量/TW·h							
年份		2005	2010	2020	2030	2040	2050
参考方案	[GW]	59.08	112.82	230.66	363.76	482.76	577.26
	[TW·h]	124	247	566	892	1269	1517
适度方案	[GW]	59.08	136.54	560.45	1128.71	1399.13	1556.90
	[TW·h]	124	299	1375	2768	3677	4092
激进方案	[GW]	59.08	153.76	1072.93	2106.66	2616.21	3010.30
	[TW·h]	124	337	2632	5167	6875	7911

图 1-1 全球累计的风力发电装机容量 (GWEC, 2006)

作出的, 该报告预测了包括风能在内的所有可再生能源的增长速度。适度方案考虑了世界范围所有已存在的或计划中的对可再生能源进行支持的政策措施, 而激进方案假定了所有政策项都是支持风能并能够实现的。

1.1 风电场

世界范围内正有无数的风电场项目正在开工建设, 其中欧洲包括了海上风电场和陆上风电场, 而北美主要以大型陆上风电场为主。通常, 风电场的场址是根据风速的一般性信息事先选定的, 而风速的一般性信息是由风速图给出的, 然后, 再对当地的风速进行测量验证。至少需要一年时间对当地的风资源进行监测, 然后才能批准风电场项目并安装风电机组。

陆上风电机组经常安装在地势高的地方以利用更高的风速。但是, 陆上风电场获得许可比较困难, 因为风速高的地方经常是适宜观光和环境敏感的。

海上风电场, 特别是大型风电场, 通常离岸超过 5km 以减小对环境的影响。海上风电场的优势有: 降低了对视觉的侵扰, 减小了可闻噪声的影响, 平均风速较高而湍流较低。而海上风电场的劣势有: 风电机组的建设和运行成本较高, 将风电场接入陆上电网必须采用较长的电缆。

具有好的风力资源的地区通常远离人口稠密区, 因此需要建设新的输电线路将风电场接入主电网。例如, 估计在未来 10 年德国需要另外建设约 1400km 的高压和超高压输电线路用来接入新的风电场 (Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2005)。

较小的风电机组也许还会在乡村电气化方面得到应用, 例如应用于乡村电力系统和孤立电力系统中为医院、家庭和社区中心供电等 (Elliot, 2002)。表 1-1 根据风电机组的应用场合列出了典型风电机组的定额。

表 1-1 风电机组的应用 (Elliot, 2002)

小型 ($\leq 10\text{kW}$)	中型 ($10 \sim 500\text{kW}$)	大型 ($500\text{kW} \sim 5\text{MW}$)
1) 家庭 (联网型) 2) 农场 3) 独立的远方应用 (例如 电池充电, 水泵抽水, 通信 基站)	1) 乡村供电 2) 混合系统 3) 分布式电源	1) 风力发电厂 2) 分布式电源 3) 陆上和海上风力发电

1.2 风力发电系统

在过去的 30 年中, 风力发电技术发展很快, 主要标志是风轮的直径不断加大以及采用复杂的电力电子技术使风轮可以变速运行, 风力机尺寸的发展过程如

图 1-2 所示。

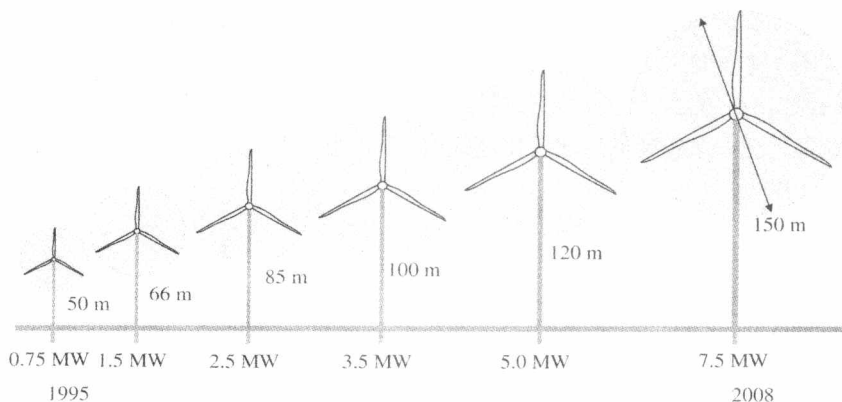


图 1-2 风力机尺寸的发展过程

1.2.1 风力机

风力机通过利用风的动力来驱动发电机而发电。风在通过叶片时会产生升力，从而给叶片施加一个旋转的力。旋转的叶片转动机舱内的一个轴，该轴与一个齿轮箱相连。该齿轮箱将旋转的速度提升到与发电机相适应的速度，而发电机通过磁场将旋转的能量转换为电能。输出的电力被送入变压器，该变压器将发电机侧约 700V 的电力变换到适合集电系统的电压，其典型值是 33kV。

风力机从叶片扫过的面积中析取动能，如图 1-3 所示。

气流中的功率为 (Manwell 等, 2002; Burton 等, 2001)

$$P_{\text{空气}} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1-1)$$

式中, ρ = 空气密度, $\rho \approx 1.225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; A = 风轮扫过的面积, m^2 ; v = 上风向自由风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

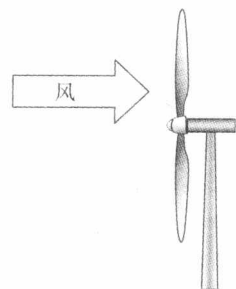


图 1-3 水平轴风力机

虽然式 (1-1) 给出了风中的功率，但是传递到风力机上的功率会有一定的下降，其下降倍数称为功率系数 C_p , C_p 的表达式为

$$C_p = \frac{P_{\text{风力机}}}{P_{\text{空气}}} \quad (1-2)$$

$$P_{\text{风力机}} = C_p P_{\text{空气}} = C_p \times \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1-3)$$

C_p 的最大值是由 Betz 极限定义的，描述为一个风力机决不可能从气流中析取超过 59.3% 的功率。实际上，风力机 C_p 最大值的范围是 25% ~ 45%。

传统上还定义一个叶尖速度比 λ , λ 的表达式为

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (1-4)$$

式中, ω = 风轮的旋转速度; R = 风轮的半径; v = 上风向自由风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

叶尖速度比 λ 和功率系数 C_p 是无量纲的, 因此可被用来描述任何尺寸的风力机的性能。图 1-4 表明, 功率系数只能在一个叶尖速度比下才能达到最大值, 即对于固定转速的风力机只能在一个风速下达到最大功率系数。因此, 使风力机变速运行的一个理由就是, 在一个较宽的风速变化范围内, 风力机可以运行在最大的 C_p 上。

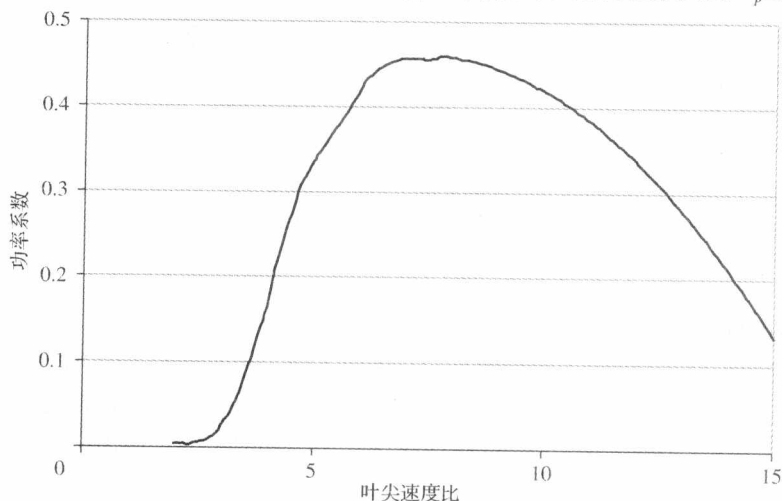


图 1-4 功率系数与叶尖速度比的关系曲线 ($C_p-\lambda$ 曲线)

风力机在不同风速下的功率输出通常用其功率曲线来描述。功率曲线给出了风速与电功率之间的稳态关系, 风速指的是轮毂高度的风速, 数据通常采用 10 分钟内测量的平均值。功率曲线的一个例子如图 1-5 所示。

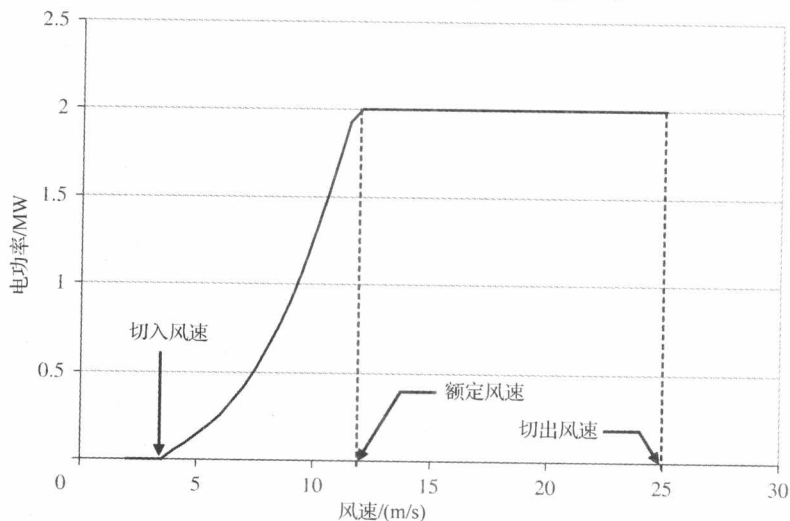


图 1-5 一台 2MW 风力机的功率曲线