

风力发电系统 与控制技术

Wind Power Generation Systems
and the Control Technologies

宋永端 主编
李鹏 刘卫 张凯 合编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

内 容 简 介

本书围绕风力发电系统的运行机理及相关控制问题,系统介绍了风能转化原理、风电机组特性与系统辨识、机组典型模块与控制系统、机组最大功率跟踪及变桨控制、机组载荷分析及独立变桨控制、机组的仿生智能监测控制,以及风电机组控制工程——整机部件与控制系统,融汇了系统搭建、算法设计、仿真实验诸方面内容。

本书既讲述了风电系统的相关基础理论,也介绍了风电控制工程中的主要运行和维护技术,适合从事风力发电、电力系统控制等领域的科研人员及工程师使用。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电系统与控制技术/宋永端主编. —北京:电子工业出版社,2012.8
ISBN 978-7-121-17736-1

I. ①风… II. ①宋… III. ①风力发电系统 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第171688号

策划编辑:徐蔷薇

责任编辑:谭丽莎 文字编辑:王凌燕

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:14.25 字数:312千字

印 次:2012年8月第1次印刷

印 数:3 500册 定价:39.90元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

◆ 前 言 ◆

风电是当前开发速度最快的可再生能源，其装机容量年增长率超过 30%。根据欧洲风能协会《关于 2020 年风电达到世界电力总量的 12% 的蓝图》报告，期望并预测 2020 年全球的风电装机容量将达到 12.31 亿千瓦。中国风能资源丰富，近十年来风电技术得到快速发展。按照《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》规划，未来 15 年，全国风力发电装机容量将达到 2000 万~3000 万千瓦，尤其对“可再生能源低成本规模化开发利用”和“超大规模输配电和电网安全保障”提出了迫切需求。

为推动这一重要领域的快速发展，本书立足于风力发电系统的基本原理，着重介绍风机系统控制基础理论及面向工程应用的关键技术。全书共 9 章，主要内容包括：

第 1 章为绪论，介绍风力发电的意义、研究现状及研究内容。

第 2 章至第 7 章针对风电系统原理和控制技术展开，分别从风能转化原理、风电机组特性与系统辨识、机组典型模块与控制系统、机组最大功率跟踪及变桨控制、机组载荷分析及独立变桨控制、机组的仿生智能监测控制这六个方面进行了阐述，既包括了风电的基本原理，也介绍了当前最新的一些研究进展。

第 8 章和第 9 章从工程角度简单介绍了风电机组的控制问题，从整机部件与控制系统、机组监测与运行维护两大方面展开，以期风电工程实践提供参考。

附录全文引用列出了两个关于风力发电机组控制器的国家标准。

本书由宋永端主编，李鹏、张凯和刘卫参与了编写工作，并受到国家 973 项目（No. 2012CB215202）及中央高校基本科研业务费专项基金（No. 2012JBM014）资助。编写过程中借鉴了风电领域同行及学者的大量学术研究思想，梁婷婷、李丹勇、范玲玲、王梦茹等也给予了帮助，在此一并致谢。

由于作者水平有限，加之书中很多章节为探索性讨论，错误及疏漏之处在所难免，请各位专家和广大读者不吝指正。

编者

2012.6.6

目 录

Contents

第 1 章 绪论	1
1.1 风电技术的研究意义	1
1.1.1 能源现状概述	1
1.1.2 发展风电的意义	2
1.2 风电技术的研究现状	3
1.2.1 风电现状总览	3
1.2.2 风电发展趋势	6
1.3 风电技术的研究内容	7
1.3.1 基本问题及研究内容	7
1.3.2 风电系统的控制技术	9
第 2 章 风能转化原理	15
2.1 风能特性	15
2.2 风能预测	19
2.3 叶轮空气动力学基本原理	22
2.3.1 桨叶受力分析	22
2.3.2 风能转换过程分析	23
2.3.3 动力学特性参数	24
2.4 叶轮空气动力学建模理论	26
2.4.1 叶素—动量理论	27
2.4.2 尾流模型	28
2.4.3 稳态失速与动态失速	29
第 3 章 风电机组特性与系统辨识	31
3.1 典型风电机组及特性	31
3.1.1 双馈风电机组	31
3.1.2 直驱风电机组	33
3.1.3 双馈与直驱的比较	35
3.1.4 半直驱机组	36
3.2 前端调速机组	36
3.2.1 机组结构	37



3.2.2	齿轮调速原理	37
3.3	风电机组辨识原理	39
3.3.1	辨识的作用	39
3.3.2	典型的辨识方法	39
3.4	基于风场数据的混合辨识方法	40
3.4.1	辨识问题描述	41
3.4.2	基于 ERA 的状态估计流程	42
3.4.3	SEI 与 ERA 混合估计算法	43
3.4.4	数值算例及分析	45
第 4 章	机组典型模块与控制系统	49
4.1	机组典型模块	49
4.1.1	叶轮	49
4.1.2	驱动链	50
4.1.3	发电机	51
4.1.4	变桨模块	53
4.2	定桨距风机控制	53
4.2.1	定桨距风机机组特性	54
4.2.2	定桨距风机控制系统	55
4.3	变桨距风机控制	58
4.3.1	变桨距风机机组特性	58
4.3.2	变桨距风机控制系统	60
第 5 章	机组最大功率跟踪及变桨控制	63
5.1	基于转矩估计的非线性 MPPT 控制	63
5.1.1	最大功率跟踪方案	63
5.1.2	最大功率跟踪控制器设计	64
5.1.3	最大功率跟踪曲线搜索	66
5.1.4	最大功率跟踪方案仿真验证	68
5.2	基于虚拟参数的 PPB 控制	70
5.2.1	系统描述与建模	71
5.2.2	面向 PPB 的误差转换	72
5.2.3	面向 PPB 的虚拟参数控制器	74
5.3	高风速区域的线性化与 PI 变桨控制	78
5.3.1	各组件非线性建模	78
5.3.2	非线性模型的线性化	80
5.3.3	PI 变桨控制器设计及仿真验证	81
5.4	自适应容错变桨控制	83
5.4.1	问题描述	83



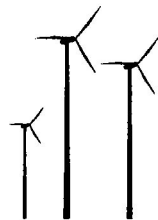
5.4.2	鲁棒容错控制	85
5.4.3	鲁棒自适应容错控制	86
5.4.4	基于神经网络的鲁棒自适应容错控制	88
5.4.5	基于自适应容错控制的机组变桨	92
第 6 章	机组载荷分析及独立变桨控制	97
6.1	风电机组载荷	97
6.1.1	机组载荷的标准	97
6.1.2	机组载荷的分类	98
6.1.3	极限载荷与疲劳载荷	98
6.2	基于 Bladed 的载荷分析	99
6.2.1	Bladed 软件概述	99
6.2.2	Bladed 模块建模	101
6.2.3	Bladed 载荷模拟计算	106
6.3	面向减载控制的独立变桨	111
6.3.1	独立变桨距机构的建模	111
6.3.2	鲁棒自适应独立变桨控制器设计	113
6.3.3	改进的鲁棒自适应独立变桨控制器	116
第 7 章	机组的仿生智能监测控制	121
7.1	基于神经网络的独立变桨及最大功率跟踪	121
7.1.1	基于神经网络的独立变桨控制	121
7.1.2	基于神经网络的最大功率跟踪	124
7.2	基于记忆的机组控制方法	128
7.2.1	机组动力学建模	128
7.2.2	基于记忆的控制器的设计	130
7.3	基于仿记忆的机组监测方法	135
7.3.1	风机故障统计分析	135
7.3.2	故障严重度分类及基本策略	137
7.3.3	故障估计与仿记忆原理	138
7.3.4	仿记忆监测控制结构	140
第 8 章	风电机组控制工程——整机部件与控制系统	145
8.1	风电整机系统部件	145
8.1.1	风轮与塔架	145
8.1.2	变桨系统	147
8.1.3	偏航系统	148
8.1.4	齿轮箱	150
8.1.5	传动链	152
8.1.6	电控系统	153



8.1.7	测量信号传感器	154
8.1.8	防雷系统	155
8.1.9	液压单元	156
8.1.10	保护配置	158
8.1.11	测风仪及航空标志灯	160
8.2	机组控制系统	160
8.2.1	控制系统构成	162
8.2.2	PLC 主控制系统	162
8.2.3	传感器与通信接口	163
8.2.4	控制系统卡件设计	164
8.2.5	安全性与设备环境	165
第 9 章	风电机组控制工程——机组监测与运行维护	167
9.1	风机状态监控系统	167
9.2	风电机组运行维护	173
9.2.1	基础与塔架维护	173
9.2.2	叶片维护	175
9.2.3	主轴与主齿轮维护	177
9.2.4	偏航系统维护	180
9.2.5	变桨系统维护	182
9.2.6	液压制动系统维护	185
9.2.7	发电机维护	187
9.2.8	对腐蚀、磨损、裂纹的检查及补救	187
9.2.9	人身安全指导	188
附录 A	风力发电机组控制器国家标准	189
	第一部分：风力发电机组 控制器 技术条件（GB/T 19069—2003）	189
	第二部分：风力发电机组 控制器 试验方法（GB/T 19070—2003）	208
	参考文献	217

第 1 章

绪 论



1.1 风电技术的研究意义

1.1.1 能源现状概述

能源和环境问题是当今世界所面临的两大课题，而能源则是备受关注的焦点，是一个国家赖以发展的生命线。随着当前世界经济尤其工业和生产规模的持续扩大，能源消耗呈现以下几大特点：

(1) 一次性能源消耗量持续增加。根据英国《2011 年 BP 世界能源统计》(如图 1.1 所示)，煤炭、石油等一次性能源消费量居高不下，而此类传统能源的开采已进入公认的中后期，发展压力巨大。

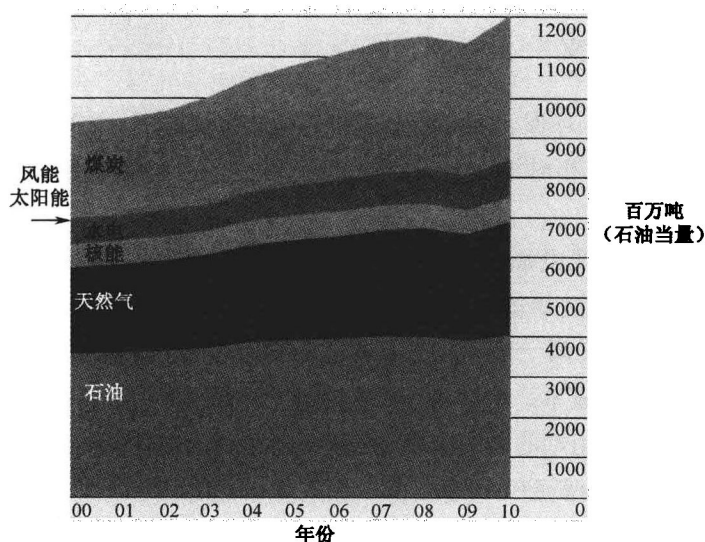


图 1.1 2011 年 BP 世界能源统计消耗情况



(2) 发展中国家能源消费增长率较高。例如,按照《2011年BP世界能源统计》,中国已超过美国成为世界能源消耗第一大国。这在引发业内争论的同时,对我国未来能源消费模式的转变提出了挑战:在满足刚性能源消费需求的情况下,做好环境保护和节能减排,加强可再生能源的利用,是一项至关重要的战略措施。

(3) 能源消费格局渐趋优化。如图 1.1 所示,占主导地位的一次性能源——石油的消耗比率正趋于稳定;风能、太阳能、水电、核能等可再生能源比率正逐步增加,在过去的 5 年中对全球能源贡献超过了 10%。

由此可见,可再生能源的发展是受到石油价格高涨、气候变化及环境影响、金融危机及政治经济刺激等综合因素的作用,未来将呈现以下两大发展趋势:

(1) 能源发展多元化和清洁化。在经历了以煤炭、石油为主导的高消耗时代后,风能、太阳能等清洁型可再生能源将日益受到重视,加入到能源大家庭并逐步扮演更重要的角色。美国 2009 年通过的《清洁能源安全法案》要求到 2020 年电力部门至少有 12% 的发电来自风能、太阳能等可再生能源,欧盟要求在 20% 以上,我国 2007 年制定的《可再生能源发展规划》也提出 15% 的发展目标。

(2) 能源发展高效化和规模化。世界各国对于能源的利用率差异显著,尤其发展中国家对于新能源的高效化利用仍有很大空间,体现在新能源本身及其配套设施、管理配置、优化供应等多方面,尤其在多种新能源大规模协调利用及监控技术上仍有待进一步提高。同时,随着能源利用规模加大,政府应逐步降低对能源发展的直接干预,依靠科技进步和政策引导,使得能源生产和利用的自主规范化程度得到提高,以吸引外来先进技术和投资,建立良性循环的能源开发利用体系。

1.1.2 发展风电的意义

风电被认为是安全、环保、技术成熟的新能源。相对核电,其更安全;相对太阳能,其大规模开发成本更低;相对于生物质能,其技术更成熟;相对于海洋能(包括潮汐能),其产业化能力更强。

起初风电曾被认为其成本远高于火电和水电而受到冷落,而随着能源危机及清洁能源大势所趋,特别是近 10 年来风力发电技术的日趋成熟,其发电成本大幅下降。大致来讲,随着发电规模提高一倍,发电成本降低 10% 左右。根据国内机构的测算,近 5 年来,从包括基础建设成本、财务成本、运营维护成本等方面综合评价,风力发电已远不到 1 元/kWh,其使用期的总成本费用已接近新投资的火电和水电。

概括来看,风电作为新型可再生能源,具有以下优势:

(1) 资源丰富。风能在地球上的蕴藏量极其充沛,其很少一部分如果能转换为电力,即可满足全部电力需求。我国幅员辽阔,可开发利用的风能储量约 $3 \times 10^8 \text{ kW}$ 。

(2) 清洁无污染。风电除了将风能转换为机械能而降低其速度外,并无煤炭、石油、



核电、太阳能板等附加污染，是相对清洁的新能源。

(3) 建设周期短。风场的建设和选址目前已有相对成熟的技术支持，可以因地制宜地快速展开风场建设。在前期条件允许的情况下，建设速度相比火电、水电提高 5~10 倍，且单机之间可独立无干扰的安装，占地面积相对较小。

(4) 战略意义大。目前我国通过了《可再生能源法》，在国家中长期发展规划中，将风电的自主创新提升至战略高度，作为提高国家技术竞争力的重要保证。而且，我国地域间的经济差异显著，西部、中北部地广人稀且发展相对落后，而风资源相对丰富。发展分散式风电场，有助于提升当地工业基础、优化能源结构、减轻电网负担，对于国家战略规划具有深远的政治意义和经济意义。

1.2 风电技术的研究现状

1.2.1 风电现状总览

表 1.1 为 BP 公司发布的 2001—2007 年各国累计风电装机容量。可见，风电在世界范围内的发展很不平衡：欧洲的装机量约占总量的 2/3，而亚太地区不到 1/5。其中，德国、美国、西班牙、丹麦等发达国家优势明显，中国也快速跃居前列，但必须清醒地看到，我国在发电效率、运行维护及自主产权方面仍与先进国家有较大差距。

表 1.1 2001—2007 年各国累计风电装机容量

年 份	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	
							装机容量	占总量的百分比 (%)
美国	4245	4674	6361	6750	9181	11635	16879	18.0
加拿大	214	270	351	444	683	1459	1845	2.0
墨西哥	3	3	3	3	3	86	86	0.1
北美洲合计	4462	4947	6715	7197	9867	13180	18810	20.0
阿根廷	27	28	30	30	31	31	31	<0.05
巴西	24	24	31	31	31	231	392	0.4
哥斯达黎加	71	79	79	79	79	79	79	0.1
中南美洲其他国家	9	9	50	54	54	56	79	0.1
中南美洲合计	131	140	190	194	195	397	581	0.6
比利时	34	45	78	106	177	222	297	0.3
丹麦	2456	2880	3076	3083	3087	3101	3088	3.3
芬兰	40	44	53	83	85	89	113	0.1
法国	115	183	274	386	775	1585	2471	2.6
德国	8734	11968	14612	16659	18445	20652	22277	23.7
希腊	358	462	538	587	705	862	987	1.0



(续表)

年 份	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	
							装机容量	占总量的百分比 (%)
爱尔兰	129	167	230	339	498	748	807	0.9
意大利	700	806	922	1261	1713	2118	2721	2.9
荷兰	523	727	938	1081	1221	1557	1745	1.9
波兰	24	54	55	56	65	170	313	0.3
葡萄牙	153	204	311	585	1087	1716	2150	2.3
西班牙	3550	5043	6420	8263	10027	11614	14714	15.7
瑞典	318	372	428	478	554	571	789	0.8
英国	525	570	759	889	1336	1967	2394	2.5
欧洲其他国家	174	329	631	904	1294	1679	1987	2.1
欧洲和欧亚合计	17833	23854	29325	34749	41068	48651	56851	60.5
伊朗	9	24	63	91	91	91	91	0.1
中东其他国家	9	9	9	9	9	9	9	<0.05
中东合计	18	33	72	101	101	101	101	0.1
埃及	69	69	123	146	180	231	310	0.3
摩洛哥	54	54	54	54	64	122	124	0.1
非洲其他国家	14	25	34	34	34	34	34	<0.05
非洲合计	137	148	211	234	278	386	469	0.5
澳大利亚	71	190	240	421	717	796	972	1.0
中国	406	473	571	769	1264	2588	5875	6.2
印度	1456	1702	2125	3000	4388	6228	7845	8.3
日本	357	486	761	991	1159	1457	1681	1.8
新西兰	35	35	56	167	167	170	321	0.3
亚太地区其他国家	24	30	37	90	194	351	498	0.5
亚太地区合计	2349	2916	3790	5438	7889	11591	17193	18.3
世界总计	24927	32037	40301	47912	59398	74306	94005	100.0

从风场建设成本的构成角度, 机组成本为主导, 占总成本的一半以上, 其余成本包括基础建设、线路建设、电气控制与测量设备、用地成本, 以及后期维护成本等。

随着技术的成熟和成本的降低, 各国装机容量迅速扩大, 机组从千瓦级快速发展至兆瓦级风机, 并向海上风场进军。根据 BTM 咨询公司 2010 年统计资料分析, 2009 年全球累计装机容量 10 大市场排名情况如表 1.2 所示。由表可见, 中国 2007—2009 年期间新增装机量尤为显著, 已跃居世界第二位。

表 1.2 2009 年全球累计装机容量 10 大市场

国 家	2007 年 (MW)	2008 年 (MW)	2009 年 (MW)	2009 年累计占市场份额 (%)
美国	16879	25237	35159	22.0
中国	5875	12121	25853	16.1
德国	22277	23933	25813	16.1



(续表)

国 家	2007 年 (MW)	2008 年 (MW)	2009 年 (MW)	2009 年累计占市场份额 (%)
西班牙	14714	16453	18784	11.7
印度	7845	9655	10827	6.8
意大利	2721	3731	4845	3.0
法国	2471	3671	4775	3.0
英国	2394	3263	4340	2.7
葡萄牙	2150	2829	3474	2.2
丹麦	3088	3159	3408	2.1

表 1.3 为 2009 年全球十大风电设备供应商在国际市场上的累计装机份额。由表可见, 到 2009 年全球 10 大供应商累计提供 1.42 亿千瓦的机组, 占总量的 84.5%。我国已有 3 家公司进入前 10 名。

表 1.3 2009 年全球 10 大风电设备供应商在国际市场上的累计装机份额

风电厂商 (国家)	截至 2009 年累计 装机容量 (MW)	截至 2009 年全球市场 累计占有率 (%)
VESTAS (丹麦)	39750	24.8
GE WIND (美国)	22961	14.3
ENERCON (德国)	19798	12.4
GAMESA (西班牙)	19225	12.0
SIEMENS (德国)	11213	7.0
SUZLON (印度)	9671	6.0
SINOVEL (中国)	5658	3.5
GOLDWIND (中国)	5315	3.3
REPOWER (德国)	4894	3.1
DONGFANG (中国)	3765	2.4

中国风能资源丰富, 主要集中在东南沿海及附近岛屿、东北、华北、西北 (三北) 及一些分散的内陆地区, 海上风能资源也蕴藏丰富。其中, 三北地区的风能储量约占全国陆地可用储量的 4/5, 且地域平坦辽阔、风速较平稳, 是大规模建设风场的良好处所。同时, 我国海岸线长, 海上风速高且静风期少, 发电利用率高; 由于海水表面粗糙度低、海风湍流强度小且风速随高度变化不明显, 因此海上风电有利于机组高效减载荷运行, 是未来风电发展的重要方向。

从机组产业化角度, 我国从“十五”期间 750kW 机组研制到目前的兆瓦级机组研制, 进步显著, 尤其控制系统、发电机、变流器、变频器、齿轮箱等关键部件, 以及桨叶、主轴、塔架、机舱等基础设施, 都具备自主研发和批量生产的能力, 这为未来更大容量、高性能的风机组件产业化奠定了基础。



1.2.2 风电发展趋势

纵观近年来国内外风电技术，其未来发展趋势可归纳为以下几个方面。

1. 水平轴风机为主流

水平轴风机目前约占 95% 的市场份额，因其传动轴短、启停容易，尤其对大型风机，在配备良好偏航装置和安装维护条件的情况下，风能转换效率较高；相比之下，垂直轴风机虽能全风向对风，变速机、发电机可以置于地面，但传动轴长，启停和变桨较困难，因而风能转换效率较低，其发展规模受到限制。

2. 单机容量扩大

风力发电的主流机型已由 10 年前的千瓦级发展到目前的兆瓦级，3~6MW 风机已陆续在国内外投入运行，并已面向离岸应用开始了 10MW 机组研制。

3. 离岸趋势渐显

欧洲的很多国家由于陆地面积的限制发展近海风场和海上风场，这类离岸风场由于其独特的风特性优势如今受到更多青睐，且相关技术日趋成熟，而美国、中国等国家更是具有丰富的海上风能资源，沿岸风速比陆地风速平均高 1/4，且主导风向稳定，有利于减小机组疲劳载荷，延长运行寿命，因此离岸风电将成为未来重要的发展方向之一。

4. 新型变桨变速模式

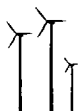
变桨变速风机克服了传统失速、定速风机风能转换效率低的缺陷，能够最大化的实现风能转化，具有载荷控制平稳、安全高效的优点。目前的风机 90% 以上为变桨变速风机，且比例还在逐步增大。随着容量和叶片体积的增大，为了优化机组载荷而采取的独立变桨技术也得到了重视和研究，即采用独立的电控调桨机构独立地调节各叶片桨距角，实现更合理的载荷分布和控制。

5. 双馈主导，直驱引领

双馈风机由于其技术成熟、发电机成本低的优势占据了风电市场的主导地位，如丹麦 Vestas、德国 Repower 等风电巨头均以双馈风机占领市场大部分份额。我国目前新增机组中双馈机型占 80% 以上，成为大多数风电企业的首选。相比之下，直驱风机虽生产成本较高，但其消除了齿轮箱问题带来的故障隐患，提高了系统运行的可靠性和稳定性，与其相配套的全功率变流技术拓宽了调速范围，具有良好的低电压穿越性能，因此此类风机及其衍生的半直驱风机代表着引领未来发展的重要方向，如德国 Enercon、Siemens 公司的直驱产品。

6. 先进的叶片制造技术

机组容量的增大一般需要更大尺寸的叶片，这首先给设计带来了困难，为了保持叶



片平稳无障碍运行,需要减轻重量并增加刚度,以减小疲劳提高工作寿命,采用强化碳纤维替代玻璃纤维及增强树脂是可行性方案之一。风机专用新翼型设计也得到广泛研究,以改善叶片气动性能。

同时,叶片增大给运输带来了困难,为此有厂商致力于分段叶片的研发,则研发良好的接合技术,基于先进合成材料进行叶片制造成为关键。

7. 良好的低压穿越能力

风电规模的迅速扩大使其与电网的耦合程度加深,电网故障造成风机自保护而引起的脱网将严重影响电力系统稳定性,因此要求机组在电网故障出现电压跌落的情况下不脱网运行(即所谓低压穿越, LVRT),在故障排除时恢复正常运行状态。这就对风电机组的电网友好性能提出了更高要求。

8. 并网与离网互补运行

风电并网是主导趋势,但在某些特殊区域,如一些孤岛、偏僻及人员稀少的地域,电网规模小,离网型风电系统更加适用。

9. 风场建设和运行维护技术

风场建设包括选址、评估、基础建设、机组安装、后期维护等多方面高质量要求,目前已有对应的成熟商业软/硬件实现方案。未来将重点发展大规模多能源协同运行下的优化控制技术,降低风场建设及后期的运行维护成本,提高发电质量和稳定性。

1.3 风电技术的研究内容

1.3.1 基本问题及研究内容

风电技术的基本原理:通过空气的流动形成的风来推动叶片转动,产生机械能,进而利用发电机将机械能转换为电能。因此,典型的风机主要包括叶轮和发电机两大主体,前者将风能转换为机械能,后者将机械能转换为电能。当然,实际运行还有一系列附属组件,包括叶片、机舱、齿轮箱、塔架、基座、控制系统、监测系统、辅助缆线等,各部件之间只有良好协调配合才能保证在风机允许的风速范围内实现安全的“启动—运行—停机”,高效地产出电能。

理论上,风机可实现风能到机械能最高 59.3% 的转换(称为 Betz 极限,后续章节将详述),实际运行中,由于控制策略、运行损耗等多种因素影响,输出电能的转换率在 20%~50% 之间。这一方面要求有良好的最大功率跟踪控制策略和运行状态,以增大相对的投入产出比率,另一方面要求系统具有稳定可靠的运行性能,以减少后期维护投入。例如,采用永磁同步直驱发电机可以优化输出功率、减小齿轮箱故障,但其体积、质量、



成本都将大于现有双馈感应发电机；采用 MW 级大型机组可以提高发电量，但其运输、吊装、维护成本也会随之提高。因此，根据风况设计和优化整体策略，是风场建设和实施的一项重要步骤。

至此，可将风电技术的基本问题概括为：高效、稳定、安全、低成本地实现风能转化和友好并网。可见，风电是一项综合性、集成性较高的技术，涉及材料学、工程力学、空气动力学、电机学、机械技术、电力电子技术、自动控制技术等多领域交叉学科。而且，作为动力源的风本身具有的随机性和不连续性的特点，决定了风机载荷的多变性和运行工况的复杂性。因此，从系统原理与控制角度，归纳出以下几项主要研究内容。

1. 动力学与建模

动力学与建模对于风机是紧密相连的两个问题：通过对机组各部件动力学特性进行分析，选择合理的建模策略，进而通过合理的建模准确描述系统在各种工况下的动力学行为。由于风能的不稳定性决定了对设计的机组需要进行计算、模拟和验证，特别是大容量风机的载荷计算与振动性能分析是决定整机特性的关键，同时风电系统的可靠运行需要合理精确的模型分析。因此进行动力学研究与建模是风电系统设计和优化的关键和基础。一般风机的动力学主要指空气动力学及结构动力学。

空气动力学的研究主要面向风能吸收问题，以叶片、叶轮作为研究对象，基于叶速理论及圆盘理论，研究湍流特性、叶片几何特性、动态入流特性，分析翼型的升力和阻力，进行气动载荷计算；对极端气候条件下的风机响应特性进行评估，分析特征模态和动态特性。从而研究如何在多种工况条件下优化风机动力学性能。

结构动力学的研究主要面向风机的形变效应问题。由于气动载荷受到叶片振动速度的影响，因此空气动力学与结构动力学之间存在着耦合关系，两者之间通常基于 BLADED 等载荷计算等途径进行交叉设计和分析。注意到风机的机舱、塔架、叶片等组件非严格刚体，存在弹性变形和相互耦合，因此设计时要考虑整机的运动形态和动力学响应，如基于有限元、多体动力学、模态分析等理论，进行整机运动学、动力学、气动弹性及气动载荷稳定性等方面的研究，从而向大型风机、柔性组件、结构优化的方向发展。

2. 发电机设计

发电机是风力发电系统中重要的能量转换部件，因此研制和选用运行可靠、效率高、控制且供电性能良好的发电机是风机系统设计的一个重要内容。风力发电中主要的发电机类型为：异步发电机、双馈异步发电机和同步发电机。恒速恒频发电系统中，多采用笼型异步发电机，变速恒频发电系统多采用双馈异步发电机和同步发电机。目前，世界上风能转换正由恒速恒频向变速恒频系统过渡，变速恒频系统的主要优点为机组在各种风速下可获得最大能量转换，延长风电机组寿命。对于恒速恒频系统而言，当风速突然变化时，巨大的风能将通过叶片传递给主轴、齿轮箱和发电机等部件，产生很多的机械



应力,造成上述部件的疲劳损耗。因此,下面将着重分析用于变速恒频系统中的双馈异步发电机和同步发电机的特点。

(1) 双馈异步发电机。双馈异步发电机起源于绕线式转子异步发电机,这种结构的发电机是通过对其转差频率的控制,来实现发电机的双馈调速。风速的变化通过增速齿轮箱传递到发电机,使得发电机的转子转速发生变化,为保持定子电流频率的恒定,可以控制转子电流的频率,这由变频器来控制,且所需变频器的功率较小,一般为发电机额定输出功率的 $1/3$ 。在加入体积庞大的增速齿轮箱后,双馈异步发电机的转子转速一般可达到 $1000\sim 1500\text{r/min}$ 。运行经验表明,齿轮箱的存在,增加了系统的总成本,并且齿轮箱噪声大、故障率较高、维护量大、可靠性低,同时由于其能量损失,也降低了能量转换的效率。

(2) 同步发电机。同步发电机有电励磁同步发电机和永磁同步发电机两种,永磁同步发电机不需要励磁绕组和直流励磁电源,取消了容易出故障的集电环和电刷装置,不存在励磁绕组的铜耗,比同容量的电励磁式的发电机效率高,结构简单,运行可靠。但同时永磁发电机也存在体积大、磁场难以调节、变流器容量大、成本高等缺点。

风力发电系统要求发电机高质量地将风能转化为频率、电压恒定的交流电;高效率地实现机电能量转换,以降低每度电成本;稳定、可靠地同电网等其他发电装置联合运行,并提供稳定的电能。近年来,采用新型发电机以变速恒频的方式运行,提高风力发电机组的输出功率成为风电系统研究的热点。风电系统中的发电机向高可靠性、低维护量、少组件、低成本、高效率、高集成度的方向发展。但无论是哪种形式的发电机,其设计过程中需综合考虑的要素都包括:电磁设计、冷却设计、结构设计、绝缘设计及控制系统设计。只是不同形式的发电机设计侧重点不同。

3. 控制技术

作为风电系统运转的中枢,机组的控制技术是保证整个机组正常、安全、高效运行的基础。一般认为风电机组由空气动力学系统、发电机系统、变流系统及其附属结构组成;电控系统(总体控制)由变桨控制、偏航控制、变流控制等主模块组成,此外还有通信、监控、健康管理等辅助模块。各种控制及测量信号在机组本体系统与电控系统之间交互。下面将对此控制技术做进一步阐述。

1.3.2 风电系统的控制技术

1. 系统分层结构

根据风电系统各模块所处的位置及功能不同,可将整个系统分为三层以便研究和分析,即动力学层、控制层、监测层,如图 1.2 所示。

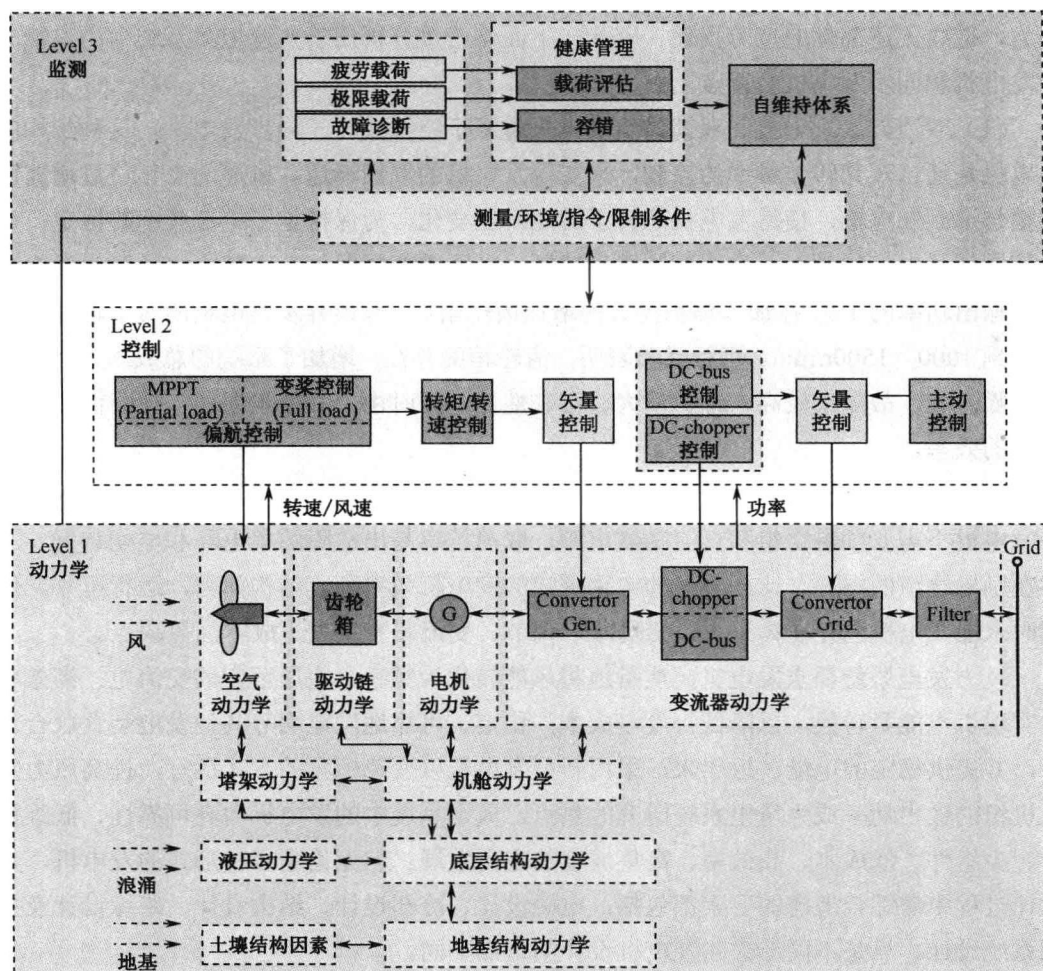


图 1.2 风电系统三层结构示意图

1) 动力学层

动力学层为最低层。风机动力学包含外部环境和本体动力学两大部分。前者包括时变的风、浪涌（离岸风机）、地基土壤等因素，是进行精确载荷分析和计算所必须考虑的；后者包括机舱动力学、底层结构动力学、地基结构动力学等，其中机舱是最为复杂的部分，包含风轮、驱动链、发电机、变流器等非线性但却直接相关风能转换效能的组件。

2) 控制层

控制层为中间层。其中，欠载荷（Partial load）时执行 MPPT（Maximum Power Point Tracking）控制，即风速小于额定风速时，控制目标为最大风能追踪，通过转矩控制调节风轮转速，从而保持最佳叶尖速比，实现最大风能转化。满载荷（Full load）时执行变桨控制，即风速大于额定风速时，主要通过变桨距限制风能吸收，使输出功率维持在额定功率。此外还有其他辅助控制措施，即为实现上述 MPPT 和变桨而采取的转矩/转速