

● 新能源应用技术丛书

风电场工程

胡宏彬 任永峰 等编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

新能源应用技术丛书

风电场工程

胡宏彬 任永峰 单广忠
刘海涛 贾轶军 薛宇 编著



机械工业出版社

作者根据工作实践撰写了本书,从专业理论和工程应用双重角度出发,针对风电场工程中的关键技术问题,如风能资源评估方法、风电场微观选址技术、风电场不同类型机组并网运行与仿真、风电场低电压穿越技术及现场测试分析、双馈式风电场与直驱式风电场电能质量测试、双馈式与直驱式风电机组的运行与常见故障维护、风电场的运行与管理等问题进行了工程实例研究和文献资料汇总,较系统地阐述了风电系统工程产业链各环节实用技术,具有一定普遍性和代表性。

本书内容全面,通俗易懂,集专业理论性、系统完备性、工程实用性于一体,期望为我国风电场工程实践提供一定的理论基础和技术依据。

本书可作为高等院校风电专业的本科生教材,也可作为研究生和风电场工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

风电场工程/胡宏彬等编著. —北京:机械工业出版社,2013.11
(新能源应用技术丛书)
ISBN 978-7-111-44609-5

I. ①风… II. ①胡… III. ①风力发电 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第256463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:闫洪庆 版式设计:常天培
责任校对:卢惠英 封面设计:姚毅 责任印制:杨曦
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
2014年1月第1版第1次印刷
169mm×239mm·18印张·348千字
0001—3000册
标准书号:ISBN 978-7-111-44609-5
定价:45.00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 教材网:<http://www.cmpedu.com>
销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>
销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>
读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

地球化石能源终将消耗殆尽，发展低碳经济、开发和利用清洁可再生能源已成为人类可持续发展和能源战略的重点。风能是一种取之不尽、用之不竭、环境友好的清洁可替代能源，风电是目前技术最成熟、开发规模最大、商业化发展最好的新能源发电方式，风电已成为全球增长最快的绿色能源。

我国幅员辽阔，陆疆总长达2万多千米，山峦起伏，还有18000多千米的海岸线，海岛密布，风能资源非常富集。大型风电基本上以集中并网风电场为主，这些风电场大多分布在电网薄弱的边远地区，已成为制约风电大规模有序开发利用的一个瓶颈和挑战。变速恒频风电技术代表当今最先进的风电技术，应用也最广泛，其中以双馈式交流励磁风电机组和直驱式永磁同步风电机组最具代表性。

风电场建设首先要进行风资源评估和宏观选址，然后在机型比选、年上网电量计算、机组容量选择和排列布置方面做科学论证分析的基础上，得出最佳的风电场微观选址方案。已经建成的风电场，运行中会遇到各种各样的技术问题，比如各种类型的风电机组并网运行对电网的电压、无功、频率、稳定性影响，风电机组低电压穿越问题、风电场电能质量问题，以及风电场的运行管理和风电机组的常见故障维护等，这些技术问题都需要从专业理论和工程实践两方面不断深入研究。本书梳理了上述技术问题，力求内容系统、完整，从多角度进行工程实例研究和文献资料汇总，以拙见飨读者，期望达到抛砖引玉的效果。

本书选题来源于风电生产、运行、维护、测试的工程实践一线，内容注重理论联系实际，较系统地阐述了风电系统工程产业链各环节实用技术，具有一定普遍性和代表性。书中涉及的内容均进行了严格核对，算例都通过了仿真或工程测试验证，力争做到准确无误并方便读者查阅。

本书作者不仅理论基础扎实，而且大多来自风电生产、运行、开发领域的一线，将多年的科研积累和现场实践经验融入本书中。因此，本书不仅适于作为高等院校风电专业的本科生教材，也可供研究生作为参考，同时适合从事风电场工程领域的科研、设计、运行、维护等工程技术人员参考使用。

本书第1章、第4章和第7章的大部分内容均由内蒙古工业大学电力学院任永峰教授编写，第2章、第3章、第5章由内蒙古电力科学研究所胡宏彬高工编写，第6章、第7章的一部分由内蒙古电力（集团）有限责任公司调度中心单广忠高工和内蒙古电力科学研究所刘海涛高工编写，第8章由北京天润新能源投资有限公司华北分公司薛宇工程师编写，第9章由中广核风力发电有限公司华北区

域运维中心贾轶军高工编写。在本书的编写过程中，内蒙古工业大学电力学院的多位研究生参与了前期文字、插图录入和后期的校对工作，分别是牛海伟、刘峰、徐少华、鞠天广、布赫、陈建、韩洲、陈明轩、孙伟、柳福、孟志宏，他们为本书的付梓出版奉献了辛勤的劳动和汗水，做出了重要贡献。

在本书撰写过程中，内蒙古电力科学研究院陶军高工，华能呼和浩特风力发电有限公司的王立武高工对本书的具体内容提出了很多建设性的指导意见，在此谨向他们致以诚挚的谢意。本书的完成也得益于前人所做的工作，在此对本书所参考的有关书籍、期刊、标准、技术文件等内容的原作者表示感谢。

本书的编写得到了国家自然科学基金（51367012）、教育部新世纪优秀人才支持计划（NCET-11-1018）、教育部科学技术研究重点项目（210037）、内蒙古自然科学基金项目（2011BS0903）、内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划、风能太阳能利用技术省部共建教育部重点实验室和风力机流固耦合及控制创新团队的大力资助，作者在此深表谢意。

本书得到了机械工业出版社的大力支持，付承桂编辑为本书的成稿和顺利出版倾注了大量精力，特此致谢。

限于作者的业务水平和学识经验，书中疏漏、谬误与不当之处在所难免，殷切希望同行专家和广大读者不吝指正。

新能源技术相关图书

序号	书 名	书号	定价	出版日期
1	光伏技术与工程手册	33935-9	198	201107
2	风电场工程技术手册	14023-8	88	201002
3	英汉太阳能词典	43530-3	88	201309
4	太阳能光伏并网发电及其逆变控制	31800-2	58	201305
5	风力发电机组设计、制造及风电场设计、施工	41423-0	59.8	201305
6	风力发电机组理论与设计	40451-4	69.9	201301
7	海上风力发电技术	39812-7	38	201301
8	风电并网技术	38351-2	39.8	201209
9	风力发电机的原理与控制	37333-9	38	201205
10	风之能源——小型风电系统实用指南	36668-3	49.8	201203
11	双馈式风力发电机组柔性并网运行与控制	34123-9	39.8	201104
12	河北省风电装备产业技术路线图	35232-7	40	201107
13	风力发电机组原理与应用(第2版)	33860-4	44.8	201302
14	风力发电机组设计	29593-8	35	201108
15	风力发电系统低电压运行技术	25572-7	30	200910
16	风力发电中的电力电子交流技术	24971-9	36	201105
17	风力发电机组的控制技术(第2版)	10187-1	28	201307
18	载波相移调制技术及其在大功率变频器中的应用	27137-6	30	200906
19	系统电效控制技术及应用	25717-2	39	200901
20	电动汽车的新型驱动技术	29887-8	38	201202

国际电气工程先进技术译丛

序号	书 名	书号	定价	出版时间
1	太阳能电池、LED 和二极管的原理:PN 结的作用	42356-0	68	201307
2	现代电力电子学与交流传动	42978-4	69.9	201307
3	传热学:电力电子器件热管理	42003-3	98	2013007
4	功率半导体器件——原理、特性和可靠性	41727-9	98	201306
5	先进电气驱动的分析、建模与控制	39975-9	89.9	201301
6	永磁无刷电机及其驱动技术	40054-7	118	201301
7	智能电网可再生能源系统设计	39544-7	118	201301
8	燃料电池微电网应用	41446-9	68	201305
9	大规模储能技术	42412-3	58	201307
10	储能技术	41445-2	49.9	201304
11	超高压交流地下电力系统的性能和规划	37511-1	49.8	201205
12	开关变换器动态特性:建模、分析与控制	36206-7	88	201201
13	海底电力电缆:设计、安装、修复和环境影响	33950-2	68	201106
14	车辆能量管理:建模、控制与优化	41689-0	69.8	201304
15	纯电动及混合动力汽车设计基础(原书第2版)	37351-3	88	201205
16	光伏系统工程(原书第3版)	38350-5	98	201208
17	薄膜太阳能电池的基础与应用——太阳能光伏发电的新发展	35122-1	88	201109
18	环境能源发电:太阳能、风能和海洋能	42184-9	88	201307
19	光伏与风力发电系统并网变换器	38320-8	88	201209
20	风能与太阳能发电系统——设计、分析与运行	24937-5	50	201101

(续)

序号	书 名	书号	定价	出版时间
21	风电系统电能质量和稳定性对策	42316-4	58	201307
22	风能系统——实现安全可靠运行的优化设计与建设	41950-1	128	201306
23	风力发电系统——技术与趋势	41309-7	118	201305
24	风力发电机组技术与应用	42396-6	68	201307
25	风力发电工程指南	39725-0	78	201211
26	风力发电系统的功率变换与控制	38169-3	88	201205
27	风能原理、风资源分析及风电场经济性	34207-6	58	201107
28	风电并网:联网与系统运行	35016-3	68	201108
29	风电场并网稳定性技术	31775-3	58	201101
30	风力发电系统	31911-5	49	201101
31	风力发电系统优化控制	31025-9	68	201009
32	风力机控制系统原理、建模及增益调度设计	25829-2	29	201008
33	高效可再生分布式发电系统	28562-5	149	201001
34	分布式发电——感应和永磁发电机	28287-7	59	201001
35	配电可靠性与电能质量	24040-2	35	200806
36	高压输配电设备实用手册	24995-5	88	200901
37	超高压交流输电工程(原书第3版)	24446-2	78	200810
38	柔性交流输电系统在电网中的建模与仿真	34889-4	98	201111
39	智能电网中的电力电子技术	31079-2	88	201111
40	电网保护	28194-8	88	201001
41	电力电容器	21597-4	40	201004
42	电力系统中的电磁兼容	24402-8	40	200808

以上图书由机械工业出版社 电工电子分社出版。如需要更多的专业图书信息,请登录 WWW.cmpbook.com。

地址:北京市西城区百万庄大街22号(100037)

购书咨询:010-88379766

如要出版新著,请与编辑联系。

编辑电话:010-88379764

投稿邮箱:fuchenggui52@163.com

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 国内外风电的研究现状及发展趋势	1
1.1.1 国外风电概况	1
1.1.2 国内风电概况	3
1.2 变速恒频风电技术	5
1.2.1 异步发电机变速恒频风电系统	6
1.2.2 交流励磁双馈式发电机变速恒频风电系统	7
1.2.3 无刷双馈式发电机变速恒频风电系统	7
1.2.4 直驱式永磁同步发电机变速恒频风电系统	8
1.2.5 开关磁阻发电机变速恒频风电系统	9
1.3 风电设备制造业的发展状况	9
1.3.1 国内风电设备制造业概况	10
1.3.2 国外风电设备制造业概况	14
1.4 海上风电场简介	17
1.4.1 海上风能的优点	18
1.4.2 国内海上风电发展概况	18
1.4.3 国外海上风电发展概况	21
1.4.4 海上风电设备制造业概况	22
第 2 章 风能资源评估	24
2.1 风的测量	24
2.1.1 测风系统的组成	24
2.1.2 测风设备	25
2.1.3 测风需要注意的问题	28
2.2 风电场所在地风能资源评估	29
2.2.1 风能资源评估的目的和技术标准	29
2.2.2 风能资源评估的步骤	30
2.3 数据验证、处理和报告	31
2.3.1 数据验证	31
2.3.2 数据处理和报告	37
2.3.3 风能资源评价	40
2.4 风能资源评估软件工具介绍	41
2.4.1 WAsP 软件	41

2.4.2	WindFarmer 软件	43
2.4.3	WindPRO 软件	44
2.4.4	WindSIM 软件	50
第3章 风电场选址技术及实例分析		52
3.1	风电场选址技术概述	52
3.1.1	风电场选址需考虑的基本要素	52
3.1.2	风电场选址步骤	54
3.2	风电场宏观选址	55
3.2.1	风电场宏观选址的基本原则	55
3.2.2	风电场宏观选址的方法步骤	55
3.2.3	场址比选	56
3.3	风电场微观选址	56
3.3.1	风电场微观选址的基本原则	56
3.3.2	风电场微观选址的方法步骤	56
3.3.3	机型比选	57
3.4	风电场年上网电量及容量选择和排列布置	57
3.4.1	风电场年上网电量的计算	57
3.4.2	风电机组的容量选择	58
3.4.3	风电机组的排列布置	59
3.5	某风电场风能资源评估和微观选址实例分析	60
3.5.1	风电场风能资源评估	60
3.5.2	风电机组选型及布置	69
第4章 风电场并网运行技术		75
4.1	风电场并网技术	75
4.1.1	同步风电机组的并网技术	75
4.1.2	异步风电机组的并网技术	76
4.1.3	交流励磁变速恒频风电机组并网控制	80
4.2	风电对电力系统的影响	81
4.2.1	风电并网静态电压稳定性研究	82
4.2.2	风电并网暂态电压稳定性研究	83
4.2.3	风电并网电网频率稳定性研究	84
4.3	风电场接入电力系统技术规定	84
4.3.1	风电场并网技术规范、标准	84
4.3.2	风电场无功配置及电压	85
4.3.3	风电场有功功率和频率	89
4.3.4	风电场电能质量	91
4.3.5	风电场并网二次部分	92
4.3.6	风电场试验检测	93

4.4 风电机组并网运行与仿真分析	93
4.4.1 直驱式永磁同步风电机组并网仿真分析	93
4.4.2 双馈式异步风电机组并网仿真分析	98
第5章 风电场低电压穿越技术	102
5.1 风电系统低电压穿越技术	102
5.1.1 低电压穿越技术研究的必要性	102
5.1.2 现有的低电压穿越技术	103
5.2 低电压穿越测试实例	109
5.2.1 风电场概况	110
5.2.2 主要设备参数	110
5.3 风电机组基本参数	111
5.4 测试设备及程序	112
5.4.1 试验设备	112
5.4.2 试验步骤	112
5.5 测试实例分析	113
5.5.1 电压跌落至 75% U_e	113
5.5.2 电压跌落至 50% U_e	116
5.5.3 电压跌落至 20% U_e	120
第6章 风电场电能质量测试	124
6.1 电能质量	124
6.1.1 供电电压偏差	125
6.1.2 电力系统频率偏差	126
6.1.3 电力系统谐波	127
6.1.4 电压波动和闪变	128
6.1.5 三相电压允许不平衡度	130
6.1.6 暂时过电压和瞬态过电压	130
6.2 风电场电能质量测试	132
6.2.1 测量程序	132
6.2.2 测量条件	133
6.2.3 测试设备	134
6.2.4 电能质量评估	134
6.3 风电场电能质量测试实例	137
6.3.1 双馈式风电场电能质量测试	137
6.3.2 直驱式风电场电能质量测试	139
6.4 电能质量测试数据及录波图	140
6.4.1 某风电场电能质量测试数据及录波图 (一)	140
6.4.2 某风电场电能质量测试数据及录波图 (二)	148
第7章 双馈式风电机组的运行与故障维护	157

7.1 双馈式风电机组的运行与维护	157
7.1.1 双馈式风电机组的自动运行（以东汽 FD77-1500kW 机组为例）	157
7.1.2 双馈式风电机组检修维护的注意事项	161
7.2 华锐 FL1500 系列风电机组故障处理及维护维修	165
7.2.1 FL1500 系列风电机组的常见故障	165
7.2.2 FL1500 系列风电机组的维护及维修	175
第 8 章 直驱式风电机组的运行与故障维护	195
8.1 直驱式风电机组的运行与维护（以金风科技 GW1500 系列风电机组为例）	195
8.1.1 直驱式风电机组的运行规程	196
8.1.2 机组运行维护安全规范	199
8.1.3 风电机组的保护措施	204
8.1.4 直驱式风电机组发电机的维护	208
8.2 金风科技 GW1500 系列风电机组常见故障及维护维修	215
8.2.1 GW1500 系列风电机组简介	215
8.2.2 GW1500 系列风电机组维护及维修	233
第 9 章 风电场的运行、监控与管理	256
9.1 风电场运行	256
9.1.1 风电机组运行	256
9.1.2 风电场运行监控	261
9.1.3 风电场调度运行	263
9.1.4 风电机组运行方式的优化	263
9.1.5 风电场设备巡视	264
9.2 风电场管理	265
9.2.1 风电场运行管理	265
9.2.2 安全作业与管理	271
参考文献	275

第 1 章 绪 论

1.1 国内外风电的研究现状及发展趋势

风能的动力应用已有数千年的悠久历史，但风电的研发始于 19 世纪末期，直至 20 世纪七八十年代并网风电场才进入现代电力系统。

1.1.1 国外风电概况

随着现代科学技术的飞速发展，特别是空气动力学、尖端航天材料和大功率电力电子技术应用于新型风电系统的开发研制，风电在近 20 年里有了飞速发展。欧美国家在风能的开发利用方面已取得了巨大成就，以丹麦、德国、西班牙、美国为主形成了一个规模巨大的产业链条——从风电机组的制造到机组的销售，从基础科学研究到工程实际应用，风电已成为当今电力系统最为活跃的研究领域之一。

风能世界各国呈快速增长趋势，风电已经不再是补充能源，是最具有商业化发展前景的新兴能源。2013 年 4 月，世界风能协会发布的《2012 年世界风能报告》指出，2012 年世界风电新增装机容量近 45000MW，美国以 13124MW 位列第一，中国以 12960MW 位列第二，德国和印度则分别以 2415MW 和 2336MW 位列第三和第四。总投资额超过 560 亿欧元，其中美国投资近 190 亿欧元，欧洲投资约为 128 亿~172 亿欧元，巴西投资约为 26.3 亿欧元。截至 2012 年底，世界风电总装机容量达 282587MW，其中 2012 年累计增加 19%，中国以 75324MW 的装机容量居世界之首，美国则位列第二，为 60007MW。鉴于 2012 年的经济形势，这已是一个相当高的行业增长率了，尽管它低于过去十年平均每年 22% 的增长率。世界风能协会预计，2013~2017 年的 5 年间世界风电新增装机容量年均增长约为 7%，到 2017 年末，全球风电累计总装机容量将达 500000~536000MW，其中亚洲 200000MW，欧洲 170000MW，北美 120000MW，拉美 16500MW。此外，世界风电十强之外的国家风电装机容量也开始上升，这说明世界上许多国家已经认识到了风电的重要性，其中拉美地区显示出了令人鼓舞的增长，新增装机容量超过一倍，这主要归功于巴西和墨西哥风电的迅猛发展。

2012 年世界风电总装机容量和新增装机容量前十位国家见表 1-1。

表 1-1 2012 年世界风电总装机容量和新增装机容量

	总装机容量 /MW	百分比 (%)		新增装机容量 /MW	百分比 (%)
中国	75324	26.7	美国	13124	29.3
美国	60007	21.2	中国	12960	28.9
德国	31308	11.1	德国	2415	5.4
西班牙	22796	8.1	印度	2336	5.2
印度	18421	6.5	英国	1897	4.2
英国	8445	3.0	意大利	1273	2.8
意大利	8144	2.9	西班牙	1122	2.5
法国	7564	2.7	巴西	1077	2.4
加拿大	6200	2.2	加拿大	935	2.1
葡萄牙	4525	1.6	罗马尼亚	923	2.1
其他	39853	14	其他	6737	15.1
前十总计	242734	86	前十总计	38062	84.9
全球总计	282587	100	全球总计	44799	100

注：数据来源：中国风能协会。

欧洲各国是风电技术传统强国，其中利用风能最成功的国家是德国、西班牙和丹麦，欧洲新增的电力装机容量中大约有 1/2 将由风电提供，美国和加拿大是北美利用风能最好的国家。为促进风电的发展，世界各国政府特别是欧美国国家出台了許多优惠政策，主要包括有：投资补贴、低利率贷款、规定新能源必须在电源中占有一定比例、从电费中征收附加基金用于发展风电、减排 CO₂ 奖励等。欧洲的德国、丹麦、荷兰等采用政府财政扶持、直接补贴的措施发展本国的风电事业；美国通过金融支持，由联邦和州政府提供信贷资助来扶持风电事业；印度通过鼓励外来投资和加强对外合作交流发展风电；日本采取的措施则是优先采购风电。

随着风电并网功率和风电场在电力系统中穿透功率的快速增长，围绕并网的电压波动、闪变、谐波、稳定性等成为重要的研究课题。由于风具有天然的随机性，风电并网和其他常规发电并网有很大区别，大型风电并入电力系统运行对整个电力系统构成新的挑战，高风电穿透水平要求重新考虑电力系统运行方式。在恒速恒频风电占主导地位时，软并网技术是研究热点，软并网技术是指通过控制发电机与电力系统之间用做并网开关的双向晶闸管的触发延迟角来控制并网冲击电流，以达到平滑并网的目的，但该技术的适用条件受到发电方式的限制。近年来，全球风电技术经历了快速发展，在欧洲，双馈式发电机从 2002 年开始变成主导技术，市场占有率超过 50%，采用双馈式发电机和通过电力电子接口并网成为现代风电的主要趋势，大型风电场及其并网已经成为当代电力系统一个重要的研究领域。国外对双馈式发电机的数学建模、控制策略、并网引起的电能质量问题进行了深入研究并给出了各自的结论。随着风电机组单机容量和风电场规模

的扩大, 风电场对地区电网的稳定性造成的影响不可忽视, 大型风电低电压穿越技术成为研究热点。

1.1.2 国内风电概况

在我国, 目前大多数的发电厂是用传统能源进行发电, 这不仅对环境造成了污染, 随着化石燃料的枯竭也将引起我国的能源危机, 使我国能源问题面临严峻的挑战。寻求新的可替代能源及开发新能源发电技术, 成为我国 21 世纪重大的研究课题, 关系到我国未来的科技与经济的发展, 新能源是一个十分广阔的研究领域。

我国幅员辽阔, 海岸线长, 风能资源比较丰富。根据气象部门的资料, 我国 10m 高度陆地风能理论储量为 32.26 亿 kW, 估计 10% 可供开发, 再考虑到实际风能扫掠面积为圆形与正方形的差别系数为 0.785, 则陆地风能实际可开发量约为 2.53 亿 kW, 近海风能资源大约为 7.5 亿 kW, 仅次于美国和俄罗斯, 居世界第三位。全国风能详查和评价结果显示, 我国风能资源丰富, 全国陆上 50m 高度层年平均风功率密度大于等于 $300\text{W}/\text{m}^2$ 的风能资源理论储量约为 73 亿 kW, 陆上 80m 高度, 风速达到 $6.5\text{m}/\text{s}$ 的风能资源技术开发量为 91 亿 kW。根据国际上对风能资源技术开发量的评价指标, 在年平均风功率密度达到 $300\text{W}/\text{m}^2$ 的风能资源覆盖区域内, 考虑自然地理和国家基本政策对风电开发的制约因素, 并剔除装机容量小于 $1.5\text{MW}/\text{km}^2$ 的区域后, 得出我国陆上 50m、70m、100m 高度层年平均风功率密度大于等于 $300\text{W}/\text{m}^2$ 的风能资源技术开发量分别为 20 亿 kW、26 亿 kW 和 34 亿 kW。

我国从 20 世纪 70 年代就将风能的开发利用列入“六五”国家科技攻关计划, 但以离网型风电为主, 主要解决常规电网覆盖不到的边远农牧民、岛屿居民的生产生活用电。在“七五”、“八五”和“九五”期间, 原国家计委和原国家科委分别组织了综合性风能科技攻关, 内容涉及风能资源、风电机组空气动力学、结构动力学、电机、控制和材料等。我国的大型风电从 20 世纪 80 年代中后期开始真正起步, 先引进了定桨距恒速风电机组, 90 年代引进了变桨距恒速风电机组, 近年来又引进和开发了变速恒频风电机组。

我国风电也呈现出良好的发展势头, 表 1-2 列出了 2005 年以来风电总装机容量的增长情况, 展望未来, 我国 2020 年全国风电装机容量有望突破 2 亿 kW, 我国风电在大规模非水可再生能源发电中的先行地位已经明确。

表 1-2 我国历年风电总装机容量 (单位: MW)

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
新增装机容量	507	1288	3311	6154	13803	18928	17631	12960
累计装机容量	1250	2537	5848	12002	25805	44733	62364	75324

注: 数据来源: 中国风能协会。

内蒙古不仅风能资源和风电装机排名全国第一，而且风电接入电网比例等多项指标居国内领先水平。2012年风电发电量178亿kWh，同比增长34.8%，2013年一季度风力发电45亿kWh，同比增长56%。2012年风电最大发电负荷710万kW，日最大发电量1.2亿kWh，最大当日供电量占比33%，仍然保持国内领先水平，并得到了国家能源局的高度重视。风电极大期电网系统电压正常，未发生风电大面积脱网事故。但是，由于电网调峰能力不足，冬季弃风严重，严寒期弃风达40%~50%，3月份弃风接近30%。内蒙古电力“风火并举”战略为电力系统注入了“绿色能源”的新鲜血液，并随之产生风电汇集、短期功率预测、输送、电压稳定性、动态无功潮流、配套的输变电工程等诸多新的研究课题。

此外，海上风电由于资源富集、风速稳定、不占用土地、不受地形地貌影响、单机容量大等优点成为当今风电发展的一个新趋势。目前，海上风电技术日趋成熟，并开始进入规模化开发阶段，丹麦、德国、西班牙、瑞典等国家均在建设大型海上风电场，还有许多国家也在制订近海风电发展计划。我国江苏响水20万kW风电场是国家第三批风电特许权项目，由三峡集团所属长江新能源公司负责开发，风电场首批23台1.5MW的风电机组于2010年5月18日并网运行，项目在2011年上半年实现全部134台风电机组并网发电；江苏盐城大丰风力发电有限公司规划了二期风电场工程，总容量20万kW；浙江慈溪也在一、二期10万kW风电场的基础上，又规划近海风电场装机容量10万kW；国家海上风电示范项目、上海市重大工程——东海大桥10万kW海上风电场34台3MW风电机组于2010年7月6日完成全部安装和调试，并投入并网运营。此外，2012年以来，特大型风电机组应用于海上风电呈如火如荼之势。重庆海装的5MW双馈型机组在江苏如东吊装，湘电风能的5MW直驱型机组在福建吊装，联合动力的6MW双馈型机组在山东潍坊并网发电。2013年，东汽、金风科技、明阳均有5MW以上海上风电机组下线。

由于风电的强随机性，风电穿透功率水平增大后，会对电能质量和电力系统的正常运行产生严重影响，国内对此进行了较深入的研究。有的文献对风力发电机组的无功功率极限及其控制和风电穿透功率极限进行了理论研究，并得出了我国电网目前可接受的风电穿透功率不能超过12%的理论结论，而丹麦并网运行风电穿透功率水平早已高于20%，这就产生了一个问题：如何采用新技术进一步提高我国风电穿透功率水平。

并网运行的风电场由于可以得到大电网的补偿和支撑，成为国内风电的主流。同时，国内也在积极开展兆瓦级变速恒频风电机组的研发工作，兆瓦级变速恒频风电机组是国家“863”计划重大课题，1MW变速恒频风电机组已于2005年8月并网运行。中国科学院电工研究所在承担国家“863”科技攻关计划的基

础上开发研制了 1.5MW 双馈式变速恒频风电机组控制系统及励磁变流器。兰州电机厂与清华大学及沈阳工业大学合作,于 2005 年 4 月自主研发了国内首台 1.5MW 变速恒频双馈式异步发电机,并成功并网发电。现在国内兆瓦级风力发电机除了新疆金风科技股份有限公司(后简称“金风科技”)和哈尔滨大电机研究所研制的是永磁同步发电系统外,华锐风电科技(集团)股份有限公司(后简称“华锐”)、东方汽轮机有限公司(后简称“东汽”)等厂家生产的都是双馈式风电系统。2011 年我国新安装的风电机组中,平均功率为 1.545MW,与 2010 年相比继续保持增长,制造业面向海上风电积极研制多兆瓦级风电机组。据不完全统计,到 2011 年,我国大约有 20 家整机企业宣布了研制多兆瓦级大功率风电机组的计划,功率范围多集中在 3~6MW。

此外,我国对开关磁阻发电机、爪极发电机应用于大型变速恒频风电也展开了探索性应用基础研究。我国近期风电发展的工作重点如下:

- 1) 大力加强大容量风电机组的研制,加快风电设备制造国产化步伐。
- 2) 解决好大规模风电进入电网的有关问题,使风电成为我国电力发展的重要组成部分。
- 3) 大力组织全国风能资源详查,建立数据库,为风电发展提供坚实的科学基础。
- 4) 开展海上风电场的科学、安全、合理开发的前期研究。
- 5) 采取有力措施,积极贯彻实施可再生能源法,以形成良好的发展环境。

1.2 变速恒频风电技术

风电系统按照发电机运行方式可分为恒速恒频(Constant Speed Constant Frequency, CSCF)风电系统和变速恒频(Variable Speed Constant Frequency, VSCF)风电系统两大类。

恒速恒频方式保持发电机的转速不变,从而得到恒频的电能。恒速风电机组的一个显著缺点就是风速变化时,风能利用系数不可能一直保持在最佳值,不能最大限度地捕获风能,风能利用率不高。此外,对恒速风电机组来说,当风速跃升时,风能将通过风力机传递给主轴、齿轮箱和发电机等部件,在这些部件上产生很大的机械应力,如果上述过程频繁出现会引起这些部件的疲劳损坏,因此设计时不得不加大安全系数,从而导致机组重量加大、制造成本增加。

而当风电机组采取变速运行时,风速跃升所产生的风能,其中部分被加速旋转的风轮所吸收,并以动能的形式存储于高速运转的风轮中,通过对发电机的转速控制,使风电机组运行中保持最佳叶尖速比,实现最大风能追踪控制,减小柔性风能系统传动链上的疲劳负载,提高了传动链的柔性,从而避免了主轴以及传

动机构承受过大扭矩和机械应力。当风速下降后,在相关电力电子装置调控下,将高速风轮所存储的动能释放出来并转变为电能送入电网,通过风轮的加速、减速对风能的阶跃性变化起到缓冲作用,使风力机组内部能量传输部件应力变化相对平稳,防止破坏性机械应力产生,从而使风电机组运行更加平稳和安全。

变速恒频风电是20世纪70年代中后期逐渐发展起来的一种新型风电技术,其主要优点在于发电机以变速运行。由于工业控制领域交流电动机的调速技术在很多设备中已经得到了成熟的应用,通过调节发电机转子电流的大小、频率和相位,从而实现转速的调节,可在很宽的风速范围内保持近乎恒定的最佳叶尖速比,进而实现追求风能最大转换效率;同时又可以采用一定的控制策略灵活调节系统的有功、无功功率,抑制谐波,减少损耗,提高系统效率。将调速系统和变桨距调节技术结合起来,就构成了变速恒频风电系统。尽管变速系统与恒速系统相比,风电转换装置中的电力电子部分比较复杂和昂贵,但其成本在大型风电机组中所占比例并不大,因而大力发展变速恒频技术将是今后风电的必然趋势。

变速恒频风电机组采用不同类型的发电机,并辅之相关的电力电子变流装置,配合发电机进行功率控制,就构成了形式多样的变速恒频风电系统。下面对其进行简要的介绍。

1.2.1 异步发电机变速恒频风电系统

在笼型异步发电机恒速恒频风电系统的基础上,在定子侧配备变流装置,即可构成笼型异步发电机变速恒频风电系统,其系统结构示意图如图1-1所示。由于风速的不断变化,风力机以及转子的转速也随之变化,所以发电机发出的电能的频率也是变化的。因此,在定子绕组与电网之间增加一个变流器环节,先整流再逆变就可以把频率变化的电能转换为与电网频率相同的恒频电能送入电网。这种方案实现了变速恒频,具有了变速运行范围宽的优点,适用于风速变化较大的环境,而且维护简便。但是由于变流器在发电机定子侧,变流器的容量必须与发电机的容量相等,属于全功率变换,导致变流器体积大、重量大,系统成本较高。

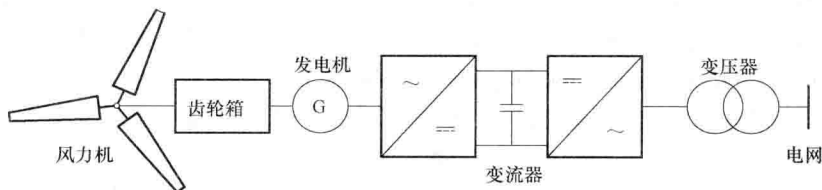


图 1-1 异步发电机变速恒频风电系统