新能源应用技术丛书



双馈式风力发电机组柔性并网运行与控制

任永峰　安中全　等著

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

新能源应用技术丛书

双馈式风力发电机组柔性并网运行与控制

任永峰　安中全　李静立
张明明　关　勇　刘海涛　著

机 械 工 业 出 版 社

针对变速恒频双馈发电机风力发电柔性并网这一高阶次、多变量、非线性、强耦合的能量转换系统，阐述相关的工作原理、理论基础、仿真建模与工程应用。对双馈发电机进行了动态数学模型推导，对其转子侧和网侧变换器及其控制策略进行了分析和介绍，基于不同软件平台（MATLAB、PSCAD、RTDS）对双馈式风电系统进行了仿真建模分析，对风电场选址技术、双馈式风电场并网技术、风电场电能质量测试技术等问题进行了探索和研究，以期为我国双馈式风力发电的理论研究和工程实践乃至相关标准的制定提供一定的理论基础和技术依据。

本书集新概念、理论性、系统性、工程性于一体，内容翔实，理论研究联系工程实践。可作为高等学校风力发电或电力电子专业的研究生、本科生教材，亦可作为从事风力发电事业的科研人员和风电场工程技术人员的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

双馈式风力发电机组柔性并网运行与控制/任永峰等著. —北京：机械工业出版社，2011.7

（新能源应用技术丛书）

ISBN 978-7-111-34123-9

Ⅰ.①双… Ⅱ.①任… Ⅲ.①双馈电机-风力发电机-机组 Ⅳ.①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 064661 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：韩 静 版式设计：霍永明

责任校对：陈立辉 封面设计：姚 毅 责任印制：李 妍

高等教育出版社印刷厂印刷

2011 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 14.5 印张 · 281 千字

0001— 3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-34123-9

定价：39.80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

社服务中心：（010）88361066

销 售 一 部：（010）68326294

销 售 二 部：（010）88379649

读者购书热线：（010）88379203

网络服务

门户网：http://www.cmpbook.com

教材网：http://www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

前　言

从可持续发展的观点来看，人类当前依靠的化石能源终将耗竭，寻找可替代传统发电方式的新能源成为当务之急，世界各国都把开发和利用可再生能源作为人类可持续发展和本国能源战略的重点。风能作为一种取之不尽、用之不竭、环境友好的清洁可替代能源，使得风力发电成为目前新能源发电技术中最成熟、开发规模最大、商业化发展最好的发电方式。风能已成为我国电力系统增长最快的绿色能源和全球发展最快的可再生能源。

随着现代科学技术的飞速发展，特别是空气动力学、尖端材料和大功率电力电子技术、新型发电机应用于风电系统的开发研制，风力发电技术在近20年里有了飞速发展。欧美发达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——从风力机的制造到机组的销售，从基础科学研究到工程实际应用，风力发电已成为当今电力系统最为活跃的研究领域之一。

我国幅员辽阔，海岸线长，风能资源比较丰富。截至2010年年底，我国风力发电装机容量已达4473万kW，展望未来，2020年我国风电装机容量很可能突破2亿kW，我国风力发电在大规模非水可再生能源发电中的先行地位已经明确。但是，我国的风电产业仍处于初级阶段，产业基础比较薄弱、自主创新能力有所欠缺、产业链也不尽完善，近年来装机容量井喷式、跨越式的发展在一定程度上将加剧我国风电产业的潜在风险，因此有必要加强并网型风电相关基础研究。毋庸置疑，变速恒频双馈式风电柔性并网运行与控制方面的研究势在必行且非常紧迫，其顺利进行和开展具有重要的科学和理论价值。

随着风能发电单机容量的提高和控制技术的进步，风电也由离网型户用分布单机式向并网型大规模集中风电场式发展，其中，双馈式风电机组由于优良的运行特性且励磁变频器仅处理转差功率而成为风能资源开发领域中一种比较先进和理想的技术，工业应用也最为广泛。并网运行的变速恒频交流励磁双馈发电机风力发电系统具有变速运行、四象限潮流控制、改善电能质量等优点，相对于定子侧连接额定功率变频器，其变频器功率仅为风力机额定功率的25%～35%，具有投资低、尺寸小、功率损耗低等优点。在交流励磁双馈发电机风力发电系统中，双馈发电机的定子直接（或通过升压变压器）与电网相连，转子由AC-DC-AC双PWM双向变换器提供励磁，通过定子磁链定向控制转子励磁电流的频率、幅值和相位，实现转子侧的“交流励磁”和有功、无功功率的解耦，进而通过

电网电压定向控制实现定子侧的“变速恒频”，同时通过功率因数控制，可使双馈发电机风电机组柔性化无冲击并网，最终为用户提供优质的“绿色”电力。

双馈式变速恒频风能发电系统是一个综合了电机制造、空气动力学、电力电子、电力系统、先进控制理论等多学科知识的高度交叉的新技术系统工程。本书重点对其电路拓扑结构、工作机理、控制策略、运行方式、电能质量、仿真建模及稳态和暂态性能进行了较全面的描述，对双馈发电机进行了详尽的动态数学模型推导。由于控制系统的分析与设计较困难，控制策略优化对双馈式风电柔性并网运行具有重要作用，直接关系到系统能否发挥理论分析所具备的功能，是系统安全稳定运行的关键，因此对其转子侧和网侧变流器及其控制策略进行了分析和介绍。在此基础上，构建了基于不同软件平台的完备的双馈式风电柔性并网运行的集动态、暂态分析为一体的仿真模型，实现不同运行条件下双馈发电机无冲击电流并网、有功无功的解耦、不同运行状态切换及最大风能追踪功能。另外，对风电场选址技术、双馈式风电场并网技术、风电场电能质量测试技术等问题进行了初步探索和研究。全书选题大多来源于生产实践，注重理论联系实际，具有一定的前沿性和代表性，撰写上遵循了深入浅出、循序渐进的原则。书中涉及的内容均进行了严格推导，算例都通过了仿真或工程测试验证，力争做到准确无误。

本书旨在对双馈式风力发电机组柔性并网运行及其控制策略进行理论和技术探讨，以期通过本书的研究工作，为实现我国风力发电的宏伟目标、推进风力发电技术的发展和创新尽绵薄之力，同时为我国双馈式风力发电的理论研究和工程实践乃至相关标准的制定提供一定的理论基础和技术依据，希望对从事风力发电领域的广大科研人员和工程技术人员能有所帮助。本书第 9 章由内蒙古电力科学研究院安中全高工整理、修订，第 8 章部分内容由内蒙古电力科学研究院关勇高工和刘海涛高工整理、修订，第 3 章由中国科学院工程热物理研究所张明明研究员和国家电网公司山东鲁能集团内蒙古分公司李静立总经理整理、修订，其余内容均由内蒙古工业大学电力学院任永峰教授撰写。在双馈式风电系统的研究过程中，我的很多研究生先后参与了研究工作，他们是周杰（现就职于内蒙古金风科技有限公司）、陈建军、孙海生、李亚林、史志国、李华、李兴刚、牛海伟、刘峰、徐少华，他们勤奋、刻苦、努力，付出了辛勤的劳动和很多的心血，为本书的完稿做出了重要贡献。

在研究的前期，内蒙古工业大学李含善教授、刘志璋教授，内蒙古电力科学研究院新能源所刘锦国高工、胡宏彬副总工以及系统所赵喜高工，香港新能源股份公司李常春博士对本书的具体内容提出了很多建设性的指导意见，并给予了极大的支持和鼓励，在此谨向他们致以诚挚的谢意。

感谢教育部科学技术研究重点项目（210037）和内蒙古自治区自然科学基金重大项目（200711020801）的资助，使得本书得以顺利完成。

本书是在内蒙古工业大学各级领导的关怀下出版的，并得到了内蒙古工业大学“电力电子与电力传动”创新团队、可再生能源特色学科的资助，作者在此表示衷心的感谢。

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顺利出版倾注了大量精力，特此致谢。

由于本书作者业务水平和学识经验有限，书中错误与不当之处在所难免，殷切希望同行专家和广大读者批评指正。

任永峰

目　　录

前言
第 1 章　绪论 …… 1
1.1　国内外风力发电的研究现状及发展趋势 …… 1
1.1.1　国外风力发电概况 …… 1
1.1.2　国内风力发电概况 …… 3
1.2　变速恒频风力发电技术 …… 5
1.2.1　异步发电机变速恒频风力发电系统 …… 6
1.2.2　交流励磁双馈发电机变速恒频风力发电系统 …… 7
1.2.3　无刷双馈发电机变速恒频风力发电系统 …… 7
1.2.4　永磁直驱型同步发电机变速恒频风力发电系统 …… 8
1.2.5　开关磁阻发电机变速恒频风力发电系统 …… 9
1.3　双馈发电机转子励磁电路拓扑及其控制 …… 9
1.3.1　转子励磁变换器主电路拓扑结构分析 …… 9
1.3.2　双馈发电机的控制策略 …… 12
1.4　风力发电对电力系统的影响 …… 16
1.4.1　风电并网静态电压稳定性研究 …… 17
1.4.2　风电并网暂态电压稳定性研究 …… 17
1.4.3　风电并网电网频率稳定性研究 …… 18
1.5　风力发电系统低电压穿越（LVRT）技术 …… 19
1.5.1　LVRT 技术研究的必要性 …… 19
1.5.2　现有的低电压穿越技术 …… 20
第 2 章　风力发电系统中双馈发电机动态数学模型 …… 25
2.1　三相静止坐标系下交流励磁双馈发电机的多变量数学模型 …… 26
2.2　交流电机理论中常用的坐标变换 …… 34
2.2.1　功率不变约束条件下的变换矩阵 …… 34
2.2.2　绕组匝数不变约束条件下的坐标变换与变换矩阵 …… 40
2.3　两相同步旋转坐标系下双馈发电机动态数学模型（Kron 方程） …… 41
2.3.1　两相同步旋转坐标系下双馈发电机按电动机惯例的数学模型 …… 41
2.3.2　两相同步旋转坐标系下双馈发电机按发电机惯例的数学模型 …… 44
第 3 章　风电场选址技术及实例分析 …… 47
3.1　风电场选址技术概述 …… 47
3.1.1　风电场选址需考虑的基本要素 …… 47

3.1.2 风电场选址步骤 …… 49
3.2 风电场所在地风能资源评估 …… 50
3.2.1 数据处理与分析 …… 50
3.2.2 风资源评估软件工具介绍 …… 53
3.3 风电场宏观选址 …… 57
3.3.1 风电场宏观选址的基本原则 …… 57
3.3.2 风电场宏观选址的方法步骤 …… 57
3.3.3 场址比选 …… 58
3.4 风电场微观选址 …… 58
3.4.1 风电场微观选址的基本原则 …… 58
3.4.2 风电场微观选址的方法步骤 …… 59
3.4.3 机型比选 …… 59
3.5 风电场年上网电量及容量选择和排列布置 …… 59
3.5.1 风电场年上网电量的计算 …… 60
3.5.2 风力发电机组的容量选择 …… 61
3.5.3 风力发电机组的排列布置 …… 61
3.6 江苏盐城市某风电场风资源评估和微观选址实例 …… 62
3.6.1 风电场风资源评估 …… 63
3.6.2 风电机组选型及布置 …… 68
第 4 章 DFIG 转子侧变换器及其控制策略 …… 76
4.1 转子侧变换器 PI 调节器设计 …… 76
4.1.1 电流环 PI 调节器设计 …… 77
4.1.2 转速环 PI 调节器设计 …… 78
4.2 转子侧变换器内模控制器设计 …… 79
4.2.1 内模控制在电流环的应用 …… 79
4.2.2 内模控制在转速环的应用 …… 81
4.3 转子侧变换器模糊控制器设计 …… 82
4.4 转子侧变换器基于以上控制策略的仿真分析 …… 85
4.5 转子侧变换器直接功率控制 …… 87
4.5.1 直接功率控制原理 …… 87
4.5.2 直接功率控制系统 …… 90
4.5.3 小功率系统仿真分析 …… 94
第 5 章 DFIG 网侧变换器及其控制策略 …… 97
5.1 网侧 PWM 变换器的数学模型 …… 97
5.2 控制策略 …… 100
5.2.1 电网电压定向矢量控制 …… 100
5.2.2 虚拟电网磁链定向矢量控制 …… 102
5.3 空间电压矢量脉宽调制（SVPWM）原理 …… 106

5.4 SVPWM 控制的仿真实现 …… 110
5.4.1 基于 MATLAB 的仿真模型 …… 110
5.4.2 基于 PSCAD 的仿真模型 …… 113
5.5 网侧变换器控制系统仿真 …… 117
第 6 章 双馈式风力发电柔性并网系统仿真建模研究 …… 120
6.1 双馈式风力发电系统并网方式概述 …… 120
6.1.1 空载并网 …… 120
6.1.2 带独立负载并网 …… 121
6.1.3 孤岛并网 …… 122
6.2 空载运行控制策略 …… 123
6.3 发电运行控制策略 …… 125
6.4 双馈式风力发电系统并网仿真 …… 130
6.4.1 基于 MATLAB 的双馈式风力发电系统建模 …… 130
6.4.2 仿真结果分析 …… 133
6.4.3 基于 PSCAD 的双馈式风力发电系统建模 …… 139
6.4.4 兆瓦级双馈式风力发电柔性并网仿真结果分析 …… 144
第 7 章 双馈发电机风电场并网仿真研究 …… 148
7.1 风电场接入系统的稳定性分析 …… 148
7.1.1 风力发电系统的频率稳定性 …… 149
7.1.2 风力发电系统的电压稳定性 …… 150
7.2 双馈发电机的标幺值方程 …… 151
7.3 风电场并网算例介绍 …… 154
7.4 风电场并网仿真研究 …… 155
7.4.1 风速突升时风电场并网仿真结果 …… 156
7.4.2 电网电压跌落时风电场并网仿真结果 …… 159
7.4.3 单相接地故障时风电场并网仿真结果 …… 161
7.4.4 三相短路故障时风电场并网仿真结果 …… 163
第 8 章 风电场电能质量测试和评估 …… 165
8.1 电能质量 …… 165
8.1.1 供电电压偏差 …… 166
8.1.2 电力系统频率偏差 …… 167
8.1.3 电力系统谐波 …… 167
8.1.4 电压波动和闪变 …… 169
8.1.5 三相电压允许不平衡度 …… 171
8.1.6 暂时过电压和瞬态过电压 …… 171
8.2 并网型风力发电系统电能质量测试和评估 …… 173
8.2.1 测量程序 …… 173
8.2.2 测量条件 …… 173

8.2.3 电能质量评估 …… 174
8.3 风电场电能质量测试实例 …… 176
8.3.1 双馈式风力发电机组风电场电能质量测试 …… 177
8.3.2 直驱式风力发电机组风电场电能质量测试 …… 179
8.4 附录 电能质量测试数据及录波图 …… 182
8.4.1 附录1 华能包头茂明风电场电能质量测试数据及录波图 …… 182
8.4.2 附录2 中广核杜尔伯特风电场（一期）电能质量测试数据及录波图 …… 189
第9章 基于RTDS的双馈式风力发电机组仿真建模研究 …… 197
9.1 电力系统主要仿真工具简介 …… 197
9.1.1 EMTPE …… 198
9.1.2 NETOMAC …… 198
9.1.3 PSCAD/EMTDC …… 199
9.1.4 BPA …… 201
9.1.5 PSASP …… 202
9.1.6 MATLAB …… 203
9.2 RTDS仿真系统介绍 …… 204
9.2.1 RTDS在国内外的应用动态 …… 205
9.2.2 RTDS系统硬件 …… 205
9.2.3 RTDS系统软件 …… 208
9.2.4 RTDS实时数字仿真系统的主要功能 …… 213
9.3 基于RTDS的双馈式风力发电系统仿真建模研究 …… 214
9.3.1 RTDS系统简介 …… 214
9.3.2 基于RTDS的双馈式风力发电系统建模 …… 215
9.3.3 基于RTDS的双馈式风力发电系统在线仿真分析 …… 215
参考文献 …… 219

第1章 绪 论

从可持续发展的观点看，化石能源终将耗竭，充分开发和利用可替代清洁能源是解决能源和环境问题的必然选择。风能作为一种取之不尽、用之不竭、环境友好的清洁可替代能源，使得风力发电成为目前新能源发电技术中最成熟、开发规模最大、商业化发展最好的发电方式。风能已成为电力系统增长最快的绿色能源和全球发展最快的可再生能源。其中，并网型双馈式风力发电机组成为工业应用最广泛的变速恒频风力发电机型。

1.1 国内外风力发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，但风力发电的研发始于19世纪末期，直至20世纪70～80年代，并网型风电场才进入现代电力系统。

1.1.1 国外风力发电概况

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力发电系统的开发研制，风力发电在近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——从风力机的制造到机组的销售，从基础科学研究到工程实际应用，风力发电已成为当今电力系统最为活跃的研究领域之一。

风能在世界各国呈快速增长趋势，风力发电已经不再是补充能源，而是最具有商业化发展前景的新兴能源。截止到2010年，世界风电总装机容量达194400MW，其中2009年增量为37466MW，风电增长率为30%，2010年增量为35800MW，风电增长率约为23%，增速有所下降。2009年世界所有安装的风力机发电量约为3400亿kW·h，相当于世界第八大经济国意大利全年的用电需求，占全球电力消耗总量的2%。就风电总装机容量而言，中国超过美国跃居世界第一；就风电新增装机容量而言，中国和印度新增装机容量占世界增量的56.4%，成为了名副其实的风电大国。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都认识到了风电的重要性，其中拉丁美洲显示了令人鼓舞的增长，新增装机容量超过一倍，这主要归功于巴西和墨西哥风力发电的迅猛发展。

2010 年世界风力发电总装机容量与新增装机容量见表 1-1。

欧洲各国是风力发电技术传统强国，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二分之一将由风力发电提供，美国和加拿大是北美利用风能最好的国家。为促进风力发电的发展，世界各国政府特别是欧美国家出台了许多优惠政策，主要包括：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 CO_2 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力发电事业；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力发电事业；印度通过鼓励外来投资和加强对外合作交流发展风力发电；日本采取的措施则是优先采购风电。

表 1-1　2010 年世界风力发电总装机容量和新增容量

	总装容量/MW	百分比（%）		新增容量/MW	百分比（%）
中国	44733	23.01	中国	18927	52.86
美国	40180	20.67	美国	5021	14.03
德国	27215	14.00	西班牙	1527	4.27
西班牙	20676	12.13	德国	1438	4.02
印度	13065	10.64	印度	1258	3.51
意大利	5797	3.00	英国	1111	3.10
法国	5660	2.91	法国	1086	3.03
英国	5203	2.68	意大利	947	2.65
加拿大	4008	2.06	加拿大	689	1.92
丹麦	3734	1.92	丹麦	269	0.75
其他	24129	12.41	其他	3531	9.86
前十总计	170271	87.59	前十总计	32269	90.13
全球总计	194400	100	全球总计	35800	100

随着风力发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。在恒速恒频风力发电占主导地位时，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作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，从而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。近年来全球风力发电技术经历了快速发展，在欧洲，双馈发电机从 2002 年

开始成为主导技术，市场占有率超过50%。采用双馈发电机和通过电力电子接口并网成为现代风力发电的主要趋势，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。国外对双馈发电机的数学建模、控制策略、并网引起的电能质量等问题进行了深入研究并给出了各自的结论。随着交流励磁变速恒频双馈式风力发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开始受到关注，双馈发电机采用Crowbar电路实现低电压穿越运行技术也成了研究热点。

1.1.2 国内风力发电概况

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，再考虑到实际风轮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。

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了的边远农牧民、岛屿居民的生产生活用电。在“七五”、“八五”和“九五”期间，国家计划委员会和国家科学技术委员会分别组织了综合性风能科技攻关，内容涉及风能资源、风力机空气动力学、结构动力学、电机、控制和材料等。我国的大型风力发电从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力发电机组；90年代，引进了变桨距恒速风电机组；近年来又引进了变速恒频风电机组。

我国风力发电呈现出良好的发展势头，表1-2列出了2002年以来风电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，我国风力发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 2002年以来中国历年总装机容量 （单位：MW）

年份	2002前	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
当年新增容量	66.3	98.3	196.8	506.9	1287.6	3311.3	6153.7	13803.2	18927.9
累计容量	465.1	563.4	760.2	1267.1	2554.7	5867.4	12019.6	25805.3	44733.3

截至2010年年底，全国电力装机容量9.62亿kW，全国风电装机容量4473万kW，全国风电并网装机容量3107万kW，占全部电力装机容量的3.2%，同比增长82%。2010年，全国全口径发电量4.23万亿kW·h，同比增长18%，其中风电501亿kW·h，同比增长74%，占全部发电量的1.2%。整个内蒙古风电总装机容量达到了1385.8万kW，风电装机量占全国总量的31%；并网容量为870万kW，风力发电177.2亿kW·h，增长率为72%，占全国风力发电量

的 35.4% 。

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，但这是一柄“双刃剑”，同时也给内蒙古电网运行带来一定压力，并随之产生风电汇集、输送、电压稳定性、动态无功潮流、配套的输变电工程等许多新的研究课题。

此外，海上风力发电由于资源富集、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国际上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，由中国长江三峡集团公司所属长江新能源开发有限公司负责开发，风电场首批 23 台 1.5MW 的风力机于 2010 年 5 月 18 日并网运行，项目计划于 2011 年上半年实现全部 134 台风力机并网发电；江苏盐城中电大丰风力发电有限公司规划了二期风电场工程，总容量为 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 风力机于 2010 年 7 月 6 日完成全部安装和调试，并投入并网运营。

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 8% 的理论结论，而丹麦并网运行风力发电穿透功率水平早已高于 20% ，这就产生一个问题：如何采用新技术进一步提高我国风电穿透功率水平？

并网运行的风力发电场由于可以得到大电网的补偿和支撑，成为国内风力发电的主流。有些科研机构已经对恒速恒频风力发电机组的软并网（通过控制发电机与电力系统之间作并网开关的双向晶闸管的触发延迟角来控制和减小冲击电流）控制系统进行了研究。魏晓云等提出了一种基于电压源换流器的交、直流混合风力发电场并网技术，具有一定新意，并给出了基于 PSCAD（电力系统计算机辅助设计）的仿真分析结果。

“变桨距风力机 + 双馈发电机”作为新型风力发电机组，是目前研究的热点。国内对双馈发电机的研究主要集中在单机建模、空载并网、柔性并网、并网后有功功率和无功功率的解耦控制、低电压穿越运行、风电场协调控制等方面。针对大型风力发电还存在一些重要科学问题尚未解决，如改善接入电网的电能质量、风电穿透功率极限、对接入电网电压稳定性的分析与控制等，变速恒频风力发电相关科学研究工作仍需加强，对其柔性并网运行与控制的关键技术有待进一步充实。

同时，国内也在积极开展兆瓦级变速恒频风力发电机组的研发工作，兆瓦级变速恒频风电机组是国家“863”计划重大课题，1MW 变速恒频发电机组已于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换器。兰州电机厂与清华大学及沈阳工业大学合作，2005 年 4 月自主研发了国内首台 1.5MW 变速恒频双馈异步发电机，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、中国东方电气集团有限公司等生产的都是双馈式风电系统。

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力发电展开了探索性应用基础研究。

以严陆光院士为代表的科学家认为我国近期风力发电的工作重点如下：

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）解决好大规模风力发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调查，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 变速恒频风力发电技术

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

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。恒速风力发电机的一个显著的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，对恒速风力机来说，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。

而当风力发电机采取变速运行时，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，使风力机运行中保持最佳叶尖速度比，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，使风力发电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，从而使风力发电机组运行更加平稳和安全。

变速恒频风力发电是20世纪70年代中后期逐渐发展起来的一种新型风力发电技术，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度比，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力发电系统。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，但其成本在大型风力发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力发电的必然趋势。

变速恒频风力发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力发电系统。下面将对其进行简要的叙述。

1.2.1 异步发电机变速恒频风力发电系统

在笼型异步发电机恒速恒频风力发电的基础上，在定子侧配备变频装置，即可构成笼型异步发电机变速恒频风力发电系统，其系统结构示意如图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频器环节，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。但是由于变频器在发电机定子侧，变频器的容量必须与发电机的容量相等，属于全功率变换，导致变频器体积大、重量大，系统成本较高。

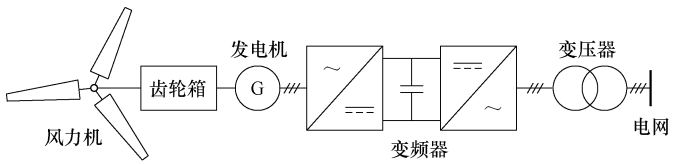


图1-1 异步发电机变速恒频风力发电系统