



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

风力发电工程技术丛书

基于柔性直流输电的 风电系统功率变换与控制

JIYU ROUXING ZHILIU SHUDIAN DE
FENGDIAN XITONG GONGLÜ BIANHUAN YU
KONGZHI

黄守道 荣飞 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



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

风力发电工程技术丛书

基于柔性直流输电的 风电系统功率变换与控制

黄守道 荣飞 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书主要介绍基于风电机组串联、并联、混联的风电系统接入技术及其控制策略, 基于柔性直流输电的风电系统两电平并网控制策略, 受端换流阀故障控制策略, 基于柔性直流输电的风电系统多电平拓扑结构设计及并网控制策略, 柔性直流输电风电系统参数设计等。阐述基于 MMC 换流阀的建模方法, 基于 MMC 换流阀的变流控制技术和电容电压平衡控制技术, 基于 MMC 换流阀的开关频率和损耗分析。同时, 进一步分析柔性直流输电风电系统故障穿越技术, 包括基于 MMC 的柔性直流输电系统低电压穿越控制策略, 基于 MMC 的受端换流阀在不对称电网故障下的运行与控制方法, 完善了基于柔性直流输电的风电系统的理论基础、结构设计和控制方法。

本书可供从事风电系统研发、生产制造和运行管理的研究人员及工程技术人员阅读, 也可作为风电技术及柔性直流输电专业的研究生教材。

图书在版编目 (C I P) 数据

基于柔性直流输电的风电系统功率变换与控制 / 黄守道, 荣飞著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017. 1
(风力发电工程技术丛书)
ISBN 978-7-5170-4966-1

I. ①基… II. ①黄… ②荣… III. ①直流输电—风力发电系统—功率—变换②直流输电—风力发电系统—功率—控制 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第006996号

| | |
|------|---|
| 书 名 | 风力发电工程技术丛书 基于柔性直流输电的风电系统功率变换与控制 JIYU ROUXING ZHILIU SHUDIAN DE FENGDIAN XITONG GONGLÜ BIANHUAN YU KONGZHI |
| 作 者 | 黄守道 荣飞 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 |
| 经 售 | 电话: (010) 68367658 (营销中心) 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 | 北京万水电子信息有限公司 |
| 印 刷 | 北京瑞斯通印务发展有限公司 |
| 规 格 | 184mm×260mm 16开本 12.25印张 290千字 |
| 版 次 | 2017年1月第1版 2017年1月第1次印刷 |
| 定 价 | 68.00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

《风力发电工程技术丛书》

编委会

顾问 陆佑楣 张基尧 李菊根 晏志勇 周厚贵 施鹏飞

主任 徐辉 毕亚雄

副主任 汤鑫华 陈星莺 李靖 陆忠民 吴关叶 李富红

委员 (按姓氏笔画排序)

马宏忠 王丰绪 王永虎 申宽育 冯树荣 刘丰

刘玮 刘志明 刘作辉 齐志诚 孙强 孙志禹

李炜 李莉 李同春 李承志 李健英 李睿元

杨建设 吴敬凯 张云杰 张燎军 陈刚 陈澜

陈党慧 林毅峰 易跃春 周建平 郑源 赵生校

赵显忠 胡立伟 胡昌支 俞华锋 施蓓 洪树蒙

祝立群 袁越 黄春芳 崔新维 彭丹霖 董德兰

游赞培 蔡新 糜又晚

丛书主编 郑源 张燎军

丛书总策划 李莉

主要参编单位 (排名不分先后)

河海大学

中国长江三峡集团公司

中国水利水电出版社

水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心

水电水利规划设计总院

水利部水利水电规划设计总院

中国能源建设集团有限公司

上海勘测设计研究院有限公司

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司

中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司

长江勘测规划设计研究院

中水珠江规划勘测设计有限公司

内蒙古电力勘测设计院

新疆金风科技股份有限公司

华锐风电科技股份有限公司

中国水利水电第七工程局有限公司

中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司

华北电力大学

同济大学

华南理工大学

中国三峡新能源有限公司

华东海上风电省级高新技术企业研究开发中心

浙江运达风电股份有限公司



前 言

随着技术的进步，海上风力发电正朝着大容量、高电压的方向发展。传统的海上风电场通过高压交流（High Voltage Alternating Current, HVAC）输电技术将交流风电传输到陆地电网，具有海底交流电缆对地电容大、工频升压站体积大、海上平台建设成本高等弊端。因此，采用基于柔性直流输电的风电场变流与控制技术成为目前海上风电向陆地输电发展的主流方向。基于柔性直流输电的风电场将原有交流风电机组通过增加 PWM 整流器获得直流输出，形成直流风电机组（DC Wind Turbine, DCWT），然后采用直流风电机组串联的方式提高风电场直流电压等级，再由 HVDC 线路传送到陆地电网。

为促进基于柔性直流输电的风电系统变流与控制技术的发展，湖南大学风力发电研究团队将近 10 年从事柔性直流输电的风电系统变流与控制的科研成果进行了整理和总结，并撰写了本书，期望本书的出版能对我国基于柔性直流输电的风电系统的进一步发展做出贡献。

本书共 7 章，主要对绪论、柔性直流输电风电系统多端接入技术、基于柔性直流输电的风电系统并网技术、基于 MMC 的换流阀变流控制技术、受端换流阀的开关频率和损耗分析、柔性直流输电风电系统故障穿越技术，以及基于柔性直流输电的直流串联直驱永磁风电场新型拓扑结构及控制等内容进行研究和探讨。本书既可作为从事风力发电变流系统、MMC 变流器，特别是基于柔性直流输电的风电系统研发、生产制造和运行管理的研究人员及工程技术人员的参考用书，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研究团队黄守道教授、荣飞博士共同撰写。王辉教授、罗德荣副教授、黄科元博士、廖武博士、黄晟博士、肖磊博士、邓

秋玲博士和彭也伦博士等对本书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际科技合作专项、国家自然科学基金、国家科技支撑计划和湖南省科技重大专项等项目的支持，本书的撰写还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，本书难免存在疏误和不妥之处，恳请广大读者不吝指正。

作者

2016年10月



目 录

前言

| | |
|--------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 风电的发展历程 | 1 |
| 1.1.1 国外风电的发展历程 | 1 |
| 1.1.2 国内风电的发展历程 | 3 |
| 1.2 风力发电基本原理 | 4 |
| 1.2.1 风力机 | 4 |
| 1.2.2 风电系统 | 5 |
| 1.2.3 风电机组控制技术 | 8 |
| 1.3 直驱永磁风电场接入技术 | 18 |
| 1.3.1 交流接入技术 | 19 |
| 1.3.2 直流接入技术 | 20 |
| 1.3.3 柔性直流输电技术 | 22 |
| 参考文献 | 29 |
| 第 2 章 柔性直流输电风电系统多端接入技术 | 31 |
| 2.1 基于柔性直流输电的风电场系统结构 | 31 |
| 2.2 基于风电机组直流侧串联的柔性直流输电系统 | 32 |
| 2.2.1 系统结构 | 32 |
| 2.2.2 控制策略 | 34 |
| 2.3 基于风电机组直流侧并联的柔性直流输电系统 | 35 |
| 2.4 基于风电机组直流侧串并联的柔性直流输电系统 | 38 |
| 2.4.1 串并联拓扑结构风电场风电机组的控制策略研究 | 40 |
| 2.4.2 串并联拓扑结构风电场的建模和仿真分析 | 41 |
| 参考文献 | 47 |
| 第 3 章 基于柔性直流输电的风电系统并网技术 | 49 |
| 3.1 两电平并网控制策略 | 49 |

| | | |
|------------|-----------------------------|-----------|
| 3.1.1 | 两电平并网拓扑结构 | 49 |
| 3.1.2 | 两电平并网控制策略 | 50 |
| 3.2 | 两电平受端换流阀故障控制 | 55 |
| 3.2.1 | 换流阀故障类型 | 55 |
| 3.2.2 | 两电平换流阀故障分析 | 55 |
| 3.2.3 | 两电平换流阀容错控制 | 58 |
| 3.3 | 基于柔性直流输电的风电系统多电平并网控制策略 | 62 |
| 3.3.1 | 多电平并网拓扑结构 | 62 |
| 3.3.2 | 多电平并网控制策略 | 63 |
| 3.4 | 基于柔性直流输电的风电系统输出滤波器设计 | 66 |
| 3.4.1 | 滤波电路设计 | 66 |
| 3.4.2 | 滤波电路元件选取 | 67 |
| | 参考文献 | 71 |
| 第4章 | 基于 MMC 的换流阀变流控制技术 | 73 |
| 4.1 | MMC-HVDC 系统结构及建模分析 | 73 |
| 4.1.1 | 受端换流阀的拓扑结构 | 74 |
| 4.1.2 | 受端换流阀的基本工作原理及数学模型 | 74 |
| 4.1.3 | 受端换流阀的简化模型 | 76 |
| 4.1.4 | 受端换流阀的子模块电容电压数学模型及变化规律 | 77 |
| 4.1.5 | 受端换流阀子模块电容电压的仿真分析 | 79 |
| 4.2 | 基于内模的受端换流阀变流控制 | 80 |
| 4.2.1 | 内模控制基本原理 | 81 |
| 4.2.2 | 受端换流阀的电流内环设计及参数整定 | 83 |
| 4.2.3 | 受端换流阀的主控制器设计 | 84 |
| 4.3 | 受端换流阀的子模块电容电压平衡控制 | 85 |
| 4.3.1 | 上、下桥臂整体电容电压控制器设计 | 85 |
| 4.3.2 | 上、下桥臂电压均衡控制器设计 | 86 |
| 4.3.3 | 桥臂内子模块电容电压均压控制 | 88 |
| 4.3.4 | 仿真分析 | 89 |
| 4.3.5 | 实验平台的搭建及实验验证 | 91 |
| 4.4 | 受端换流阀的子模块电容电压波动抑制方法 | 98 |
| 4.4.1 | 基于桥臂瞬时功率平衡的子模块电压波动抑制方法 | 98 |
| 4.4.2 | 抑制电容电压二倍频波动的环流和固有环流的对比分析 | 99 |
| 4.4.3 | 抑制子模块电容电压二倍频波动环流对受端换流阀损耗的影响 | 100 |
| 4.4.4 | 仿真分析 | 101 |
| 4.4.5 | 子模块电容电压波动抑制实验 | 102 |
| | 参考文献 | 103 |

| | |
|--|-----|
| 第 5 章 受端换流阀的开关频率和损耗分析 | 105 |
| 5.1 受端换流阀子模块的开关动作机理分析 | 105 |
| 5.1.1 传统均压算法的均压控制开关过程分析 | 105 |
| 5.1.2 改进均压算法的开关过程分析 | 107 |
| 5.2 基于最大电压偏差优化均压算法的受端换流阀开关频率和损耗计算 | 110 |
| 5.2.1 最大电压偏差优化均压算法的开关频率计算 | 110 |
| 5.2.2 最大电压偏差优化均压算法的开关损耗计算 | 113 |
| 5.2.3 仿真分析 | 115 |
| 5.2.4 最大电压偏差优化均压算法下开关频率和损耗实验 | 119 |
| 5.3 基于虚拟电容电压优化均压算法的受端换流阀开关频率和损耗计算 | 121 |
| 5.3.1 基于虚拟电容电压优化均压算法的开关频率计算 | 121 |
| 5.3.2 基于虚拟电容电压优化均压算法的开关损耗计算 | 122 |
| 5.3.3 仿真分析 | 123 |
| 5.3.4 虚拟电容电压优化均压算法下开关频率和损耗实验 | 126 |
| 5.4 受端换流阀的两种均压算法的开关频率和开关损耗对比结论 | 128 |
| 参考文献 | 130 |
| 第 6 章 柔性直流输电风电系统故障穿越技术 | 131 |
| 6.1 柔性直流输电系统低电压穿越控制策略研究 | 131 |
| 6.1.1 蓄电池储能能在柔性直流输电低电压穿越中的应用 | 131 |
| 6.1.2 带蓄电池储能的直流串联风电场低电压穿越仿真 | 133 |
| 6.1.3 转子叶轮储能能在柔性直流输电低电压穿越中的应用 | 136 |
| 6.2 基于 MMC 的受端换流阀在不对称电网故障下的运行与控制 | 146 |
| 6.2.1 电网不对称故障时基于 MMC 受端换流阀的两种典型控制方法 | 147 |
| 6.2.2 抑制负序电流时桥臂环流分析与控制 | 149 |
| 6.2.3 抑制功率二倍频波动时桥臂环流分析与控制 | 155 |
| 6.2.4 抑制负序电流时电容电压波动分析与控制 | 160 |
| 6.2.5 抑制有功功率二倍频波动时电容电压波动分析与控制 | 163 |
| 6.2.6 两种控制方式下环流和电容电压波动对比结论 | 166 |
| 参考文献 | 167 |
| 第 7 章 基于柔性直流输电的直流串联直驱永磁风电场新型拓扑结构及控制 | 169 |
| 7.1 直流串联直驱永磁风电场新型拓扑结构 | 169 |
| 7.1.1 直流串联风电场新型拓扑结构工作原理 | 169 |
| 7.1.2 直流串联风电场新型拓扑结构数学模型 | 171 |
| 7.1.3 直流串联风电场新型拓扑结构电容电感的取值 | 172 |
| 7.2 直流串联直驱永磁风电场新型拓扑结构的控制策略 | 173 |
| 7.2.1 均压环控制器设计 | 173 |

| | | |
|-------|----------------------------|-----|
| 7.2.2 | 电流环控制器设计 | 174 |
| 7.2.3 | 稳压环控制器设计 | 175 |
| 7.3 | 直流串联直驱永磁风电场新型拓扑结构平均电压最优值设计 | 177 |
| 7.3.1 | 直流串联风电场新型拓扑结构子模块平均占空比分析 | 177 |
| 7.3.2 | 直流串联风电场新型拓扑结构子模块电容平均电压分析 | 178 |
| 7.4 | 仿真分析 | 179 |
| | 参考文献 | 183 |

第 1 章 绪 论

风能是空气流动所产生的动能，它是太阳能的一种转化形式。风能是目前发展最快的绿色可再生能源之一。据世界气象组织估计，全球风能总量约为 2.74×10^9 MW，其中可利用的风能为 2×10^7 MW，比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍。风电系统是将风能转换为电能系统，目前风力发电机组的单机容量已覆盖几十瓦到数兆瓦。例如，在内陆，风电机组的主流机型额定功率为 1.5MW；在海上，风电机组的平均单机容量为 3MW，最大已达 6MW。虽然与火电和水电的上百兆瓦发电机组相比，风电机组的单机容量仍较小，但是它们可在风场中排成阵列，形成风力发电群，进行大规模风力发电，发出的电力经过电力线路送至用户。据全球风能理事会统计，2015 年全球风电装机容量一举超过核电容量，成为火电和水电外的第三大电力来源。

1.1 风电的发展历程

自 19 世纪末人们成功研制出风力发电机组并建成世界上第一座风力发电站后，一个多世纪以来，世界上许多国家纷纷研制了各种类型的风力发电设备，风力发电的重要性受到国际社会的普遍关注与高度重视。由于社会发展的需要，人们对能源的需求也越来越大，全世界都在寻求更加高效、低能耗的新型能源，因此风力发电的研究开发，其设备的生产制造、使用推广等工作取得了很大的进展。

1.1.1 国外风电的发展历程

风电起源于丹麦。早在 1890 年，丹麦政府就制定了一项风电计划，经过 10 多年的努力，制造出首批单机功率为 5~25kW 的风力发电机。时至今日，丹麦已成为世界上生产风力发电设备的大国。

20 世纪 80 年代以来，工业发达国家对风电机组的研制取得了巨大的进展。1987 年，美国研制出单机容量为 3.2MW 的水平轴风电机组，安装在夏威夷群岛；加拿大研制出单机容量为 4MW 的垂直轴达里厄风电机组，安装在魁北克省；这期间单机容量在 100kW 以上的水平轴风电机组的研究开发及生产在欧洲取得快速发展。到 20 世纪 90 年代，单机容量为 200~600kW 的机组已在中型和大型风电场中成为主导机型。进入 21 世纪以来，单机容量在兆瓦级以上的风电机组已逐渐成为主力机组，大量在风电场中运行。

德国是目前世界上风电发展最快的国家，既是风电市场大国，又是风电装备制造大国。德国西门子（Siemens）公司的海上风电具有独特优势，领跑全球海上风电市场。德国政府在能源领域的目标是到 2030 年实现可再生能源发电量占总发电量的 45%，而在风电领域的目标则是到 2020 年实现风电装机容量 6500MW，实现能源转型。



美国从20世纪70年代石油危机始,于1978年通过《公共事业管理法》对发展风电给予优惠,促进了风电的大发展,到1994年就达到1630MW,占当年世界风电总容量的53%,使美国在1997年前一直成为雄居世界第一的风电大国。但之后因石油降价及联邦政府一些法规期满失效,支持出现断层,风电价格下跌,风电发展停顿,而德国后来居上。近年来,美国又开始重视风电,对风电发展加大支持力度,旧机更新换代,制定雄心勃勃的技术研究发展计划,最终目标要将风电电价降到2.5美分/(kW·h)。

西班牙的风电发展也非常迅速,国家根据“节约与有效利用能源规划”对可再生能源进行补贴,丹麦维斯塔斯(Vestas)公司曾在西班牙一次就获得了1400MW的风电机组订单,成为世界上最大的一笔风电机组合同,可见西班牙风电发展势头的迅猛。2016年,西班牙歌美飒(Gamesa)公司与德国西门子公司合并风电业务,一举超越丹麦维斯塔斯公司和美国通用电气公司,成为全球最大的风电整机制造商。

丹麦是世界上最大的风力发电机生产国和科研强国,产量占世界以上60%以上,在其出口产业中位居第二。丹麦政府计划到2030年风电装机容量达5500MW,发电量占全国近50%,其中海上风电场装机容量将达4000MW。政府计划未来新能源(主要是风电和生物质能)将提供75%以上的能源供应,而让燃煤发电逐渐淘汰。

印度作为全球经济发展最快的发展中国家之一,长期以来都面临着严重的电力短缺。一直以来,印度政府都希望通过发展包括风电在内的可再生能源来应对这一问题,同时减少对化石燃料的依赖。印度通过实行一年快速折旧、前5年免所得税、低利率贷款等政策,成为风电发展最快的国家之一。

上述德国、美国、西班牙、丹麦和印度等5国的风电装机容量占世界风电总装机容量的80%以上。其他国家和地区,如中南美等地,发展非常缓慢,主要靠国际援助项目。亚洲和太平洋地区有较快的发展,主要是中国等。中东和非洲发展非常慢,主要也是靠国际援助。

据全球风能协会统计,2015年全球风电新增装机容量达到创纪录的6300万kW,相当于约60座核电站发电量,比2014年提高25%以上。随着技术的更新,发电成本降低、风电信赖度上升,风电的发展在2015年一举超越了核电,成为火电和水电外的第三大电力来源。截至2015年年底,风力发电能力排在全球首位的是中国(14510万kW),紧随其后依次是美国(7447万kW)、德国(4495万kW)、印度(2590万kW)、西班牙(2303万kW)。

风电作为能源领域增长最快的行业,共为全球提供了近20万个就业机会。国际能源署颁布的《2050年能源技术情景》判断,2010—2050年,全球风电平均每年增加7000万kW,风电已成为一个庞大的新兴电力市场。

风电机组单机容量持续增大,单机容量在兆瓦以上的风力发电机组已成为主力机组,大量在风电场中运行;变桨距功率调节方式由于载荷控制平稳、安全和高效等优点得到迅猛发展,在大型风电机组上得到广泛采用;风能的大规模开发今后将更多依赖于规模化、系列化和标准化,以降低成本、提高效益;随着关键技术和装备的逐渐成熟,海上风电开发将是未来发展的一个重要方向,兆瓦级海上风电机组的商业化已经成为世界风能利用的新趋势。与此同时,各种新技术和新装备的应用、标准与规范的完善、产品质量的提升和



风电市场的规范，也为风电产业长远持续发展奠定了坚实的基础。

1.1.2 国内风电的发展历程

我国是世界上风力资源占有率最高的国家，也是世界上最早利用风能的国家之一。据资料统计，我国 10m 高度层风能资源总量为 3226GW，其中陆上可开采风能总量为 253GW，加上海上风力资源，我国可利用风力资源近 1000GW。如果风力资源开发率达到 60%，仅风能发电一项就可支撑我国目前的全部电力需求。

我国风力发电起步较晚，但进展较快。风电机组的研制重点分两方面：一是 1kW 以下独立运行的小型风电机组，二是 100kW 以上并网运行的大型风电机组。

从 20 世纪 70 年代开始，在农村、牧区、海岛等地对电能的迫切需求的推动下，一些地区和部门对小型风力发电机的研究、试点和推广应用给予了重视与支持，发展迅速。进入 90 年代后期得到了快速的发展。经过科技攻关、研制开发、示范试验、商品生产和推广使用等阶段，目前小型风电机组的研制已实现全部国产化。小型风电机组的推广应用取得了明显的社会效益，在世界上有一定的影响，除了满足国内需要，还出口国外。

从 20 世纪 80 年代开始，“八五”期间，当时的国家科学技术委员会和国家计划委员会分别将大型风电机组列入科技攻关项目，组织科研单位对其关键技术进行联合攻关，在此基础上自行研制，同时组织相关单位引进国外大型风电机组，进行消化吸收，掌握大型风电机组制造技术，在此基础上进行组装或合作生产。经过多年的努力，我国大型风电机组的研制有了很大的进步，组装和合作生产的大型风电机组的主要部件和配套设备实现了国产化。

我国风电场的规划始于 20 世纪 80 年代中期。1983 年，山东荣成引进 3 台丹麦 55kW 风电机组，开始并网型风电技术的试验和示范。1986 年，新疆达坂城安装了 1 台丹麦 100kW 风电机组，1989 年又安装了 13 台丹麦 150kW 风电机组，同年在内蒙古也安装了 5 台美国 100kW 风电机组，开始了我国风电场运行实验和示范。近年来，在风电场示范应用中也取得了较好的经济效益，风电场建设取得了巨大的进展。

总结起来，我国风电行业发展经历了 6 个阶段：①1949—1959 年，老式风车应用阶段；②1960—1977 年，现代风力机械起步阶段；③1978—1983 年，科研攻关和示范应用阶段；④1984—1990 年，技术成熟和实用推广阶段；⑤1990—1997 年，调整、巩固阶段；⑥1998 年以后，走向稳定发展阶段。

能源和环境危机与国民经济可持续发展之间的矛盾促进了我国风电产业的迅猛发展，风电在我国能源结构中的地位日益受到重视。2005 年 2 月《中华人民共和国可再生能源法》颁布之后，当年风电新增装机容量超过 60%，总装机容量达到了 126 万 kW；2006 年风电新增装机容量超过 100%，总装机容量超过 260 万 kW；2007 年风电又新增装机容量 330 万 kW，总装机容量达到 604 万 kW，我国一跃成为世界上最主要的风电市场之一。我国提出的 2010 年完成风电装机容量 500 万 kW 的目标已提前 3 年于 2007 年实现。截至 2015 年年底，我国风电总装机容量达到 14510 万 kW，根据相关部门预测，如果保障得力，到 2020 年，风电总装机容量有望实现 1.2 亿~1.5 亿 kW。

在国家政策的扶持和市场的拉动下，一大批有实力的企业纷纷涉足风电产业，国外跨

国公司也积极在我国组建生产企业，风电产业整体上呈现出百花齐放、百舸争流的繁荣景象。目前我国已有 30 多家风电整机制造企业，包括兆瓦级机组在内的国产风电装备陆续下线并投入运行，国产风电装备的技术水平和质量都有了很大的提高，产能迅速提升。新疆金风科技股份有限公司目前是全球最大的直驱永磁风电机组研制企业，已形成涵盖 1.5MW、2MW、2.5MW、3MW 四大平台的整机产品系列，目前正研制 6MW 风电机组。2015 年，金风科技凭借 7.8GW 的全球新增装机容量，一跃成为当年全球最大风电整机制造商；国电联合动力技术有限公司则是我国双馈型风电机组制造的领军企业；远景能源是 2014 年我国最大的海上风电机组供应商；湘电风能有限公司拥有国际领先的直驱型风机设计制造技术，是我国大型风电装备制造业的龙头企业，目前已成功投运 5MW 直驱风电机组；中国东方电气集团有限公司拥有双馈型和直驱型两种技术流派，是我国拥有风电技术流派最全的供应商。其他颇具实力的企业还有中国明阳风电集团有限公司、上海电气集团有限公司、中船重工（重庆）海装风电设备有限公司等。

1.2 风力发电基本原理

风力发电的基本原理是利用风力机将风能转换为机械能，发电机再将机械能转换成电能，变流器则将发电机发出的电能进行变换，变换之后给用电设备供电或并入电网。风电系统主要包括风力机、发电机、变流器和控制系统等部分。风力机属于旋转机械，其作用是将风的动能转换为机械能，主要包括风轮（叶片、轮毂）、桨距调节机构和齿轮箱等。发电机属于机电能量转换装置，其作用是将机械能转换为电能，原则上各种发电机都可以用于风力发电，如直流发电机、交流发电机等，其中交流发电机主要有异步发电机、同步发电机。变流器属于电能变换装置，其作用是改变电流或电压的幅值、频率、相位或其他电气特性，变流器的范畴包括交直（AC/DC）变换、直直（DC/DC）变换、交交（AC/AC）变换、直交（DC/AC）变换。风力机、发电机、变流器这三大部件都离不开控制系统，控制系统的作用是对风电机组的运行状态进行控制，即控制风电机组从一种运行状态到另一种运行状态的过渡过程和稳态过程。

1.2.1 风力机

风力机的类型有水平轴风力机和垂直轴风力机、定桨距风力机和变桨距风力机等。按传动方式又分为齿轮传动式风力机和直驱式风力机。

水平轴风力机的风轮轴基本上为水平状态，或者说基本上平行于风向，工作时风轮基本上与风向垂直，它又有上风向风力机和下风向风力机之分。上风向风力机的风轮在塔架前面迎风旋转，如图 1-1（a）所示；下风向水平轴风力机的风轮则在塔架后面，风先经过塔架再到风力机，由于塔架干扰了一部分气流，影响风力机的效率，使性能有所下降。上风向水平轴风力机需要由转向机构保持风轮与风向垂直，以发挥风力机的最大效率，下风向风力机不需要转向机构。水平轴风力机目前最为常见，适用功率从几十瓦到数兆瓦。

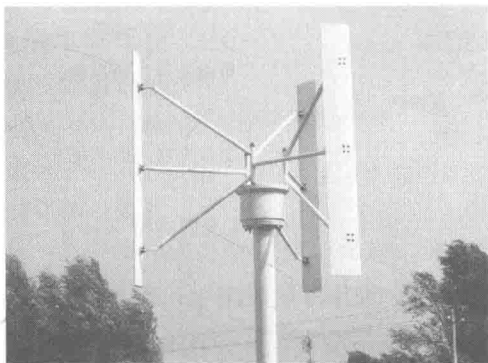
垂直轴风力机的风轮轴与大地垂直，如图 1-1（b）所示，其特点是可以从任意方向获取风能，不需要随风向调整风轮方向，其噪声小、机舱位置低、结构简单，已成为中小



型风电系统的首选，适用功率从几十瓦到几十千瓦。由于垂直轴风力机的背风叶片消耗了一部分风能，目前在大功率场合应用还较少。



(a) 水平轴风力机



(b) 垂直轴风力机

图 1-1 风力机

定桨距风力机的叶片与轮毂之间为刚性连接，叶片固定在轮毂上，叶片角度（也称为桨叶角度、桨距角）不能调节，其迎风面固定，因此它的输出功率由风力和叶片自身的气动特性决定，功率随风速变化较大。

变桨距风力机的桨距角可以调整，风小时减小桨距角使叶片迎风面积增大，风大时增大桨距角使叶片迎风面积减小，捕获的风能减小；强风时使桨距角最大，可加深叶片的失速效应，避免叶片损坏。改变桨距角可调整叶片的受力和转动速度，在风速变化时使风力机输出功率较好地保持稳定。

风力机的动力传动方式主要有齿轮传动式和直驱式两种。当风轮的转速较低，达不到发电机的转速要求时，一般采用齿轮传动式风力机，风轮经过齿轮箱增速后再带动发电机。直驱式风力机没有齿轮箱，由风轮直接带动发电机，由于没有齿轮箱，风力机的体积重量和噪声减小，但是因为风轮转速较低，一般要使用多极低速发电机，而多极低速发电机的直径和重量较普通 2 极和 4 极发电机大，这会抵消一部分省略齿轮箱的效果。此外，还有一种半直驱式风力机，它有齿轮箱但传动比较小，与直驱式风力机相比可以使用极对数较少的发电机，使发电机的体积小一些，是齿轮传动式风力机和直驱式风力机的折中型式。

1.2.2 风电系统

1.2.2.1 按风力发电机的转速是否恒定分类

根据风力发电机的转速是否恒定，可将风电系统分为定速风电系统和变速风电系统。按风力机是采用定桨距风力机还是变桨距风力机，定速风电系统又有定桨定速系统、变桨定速系统之分；变速风电系统又有定桨变速系统、变桨变速系统之分。定桨定速系统曾是 20 世纪 80—90 年代的主流风电系统，而变桨变速系统则是当前的主流风电系统。风电系统的类型如图 1-2 所示。



图 1-2 风电系统的类型

1. 定速风电系统

定速风电系统的发电机转速要求恒定，输出频率也恒定。但实际上发电机的转速随风速总有波动，因此定速风电系统的发电机一般采用笼型异步发电机，以保证发电机的转子转速波动时，定子输出频率能够恒定。这种系统的风力机通常采用定桨距风力机，称作定桨定速风电系统，它曾是 20 世纪 80—90 年代的主流风电系统。定桨距风力机的叶片经过特殊设计，具有失速特性。当风速达到临界值

时，叶片的升力系数减小，阻力系数增加，造成叶片失速，即风速在临界值以下时风轮转速随风速增加而增加，当风速超过临界值后风轮转速将不随风速增加而上升，反而略有下降。失速特性可以使风速达到临界值后，风力机的输出功率仍保持在额定功率附近。此外，还可以通过变桨距、偏航（调节风轮与风向的夹角）等手段来控制风力机输出功率的相对稳定。

由于定速风电系统是依靠定桨距叶片的失速特性、变桨距调节或偏航控制，由风力机保持笼型异步发电机的转速，使发电机能够在允许的转差范围内发电运行，因此对风速的适应范围小，风能的利用率不高。为了扩大风能的利用范围，定速风电系统常用两台不同极数的异步发电机，一般是 4/6 极电机，在风速较低时用 6 极的异步发电机发电，在风速较高时用 4 极的异步发电机发电，以扩大对风速的利用范围，但是这样增加了机舱的体积和重量。目前兆瓦级以上的大型风电系统已淘汰定速风电系统。

如果让发电机通过 AC/DC/AC 变流器连接电网，由变流器保证发电机的输出频率与电网一致，则发电机的转速就可以不受电网频率的限制，发电机的转速可以根据风力机在不同风速下的最佳输出功率来进行调节，从而达到对风能的最大利用，这就是变速风力发电的优点。因此变速风电系统的发电机转速可以变化，发电机经变流器输出频率恒定的交流电，对风能的利用率高，适用于各种交流发电机。同时，变速风电系统在控制方式上也很灵活，可以较好地调节系统的有功功率、无功功率，但控制系统较为复杂。

2. 变速风电系统

变速风电系统的风力机若采用定桨距风力机，则称作定桨变速风电系统；若采用变桨距风力机，则称作变桨变速风电系统。变桨变速系统是当前的主流风电系统，发电机多采用绕线转子异步发电机、永磁同步发电机，可以和电网平稳连接，并进行无功补偿。至于定桨变速风电系统，在小型离网运行（不并网）的场合用得较多，多采用永磁同步发电机，多数情况下将发出的电整流后给蓄电池充电，或逆变成稳定的交流电供电使用。

1.2.2.2 按风力发电机类型分类

应用于风电系统的风力发电机主要有三类，其分类如图 1-3 所示。由于风速不稳定，风力发电机一般不直接接入电网，而是通过变流器或者软启动器的方式与电网相连。

1. 基于异步发电机的风电系统

基于异步发电机的风电系统如图 1-4 所示。异步发电机通过软启动器与交流电网相连，软启动器用来抑制系统启动过程中的冲击电流和转矩波动。这种系统曾是 20 世纪