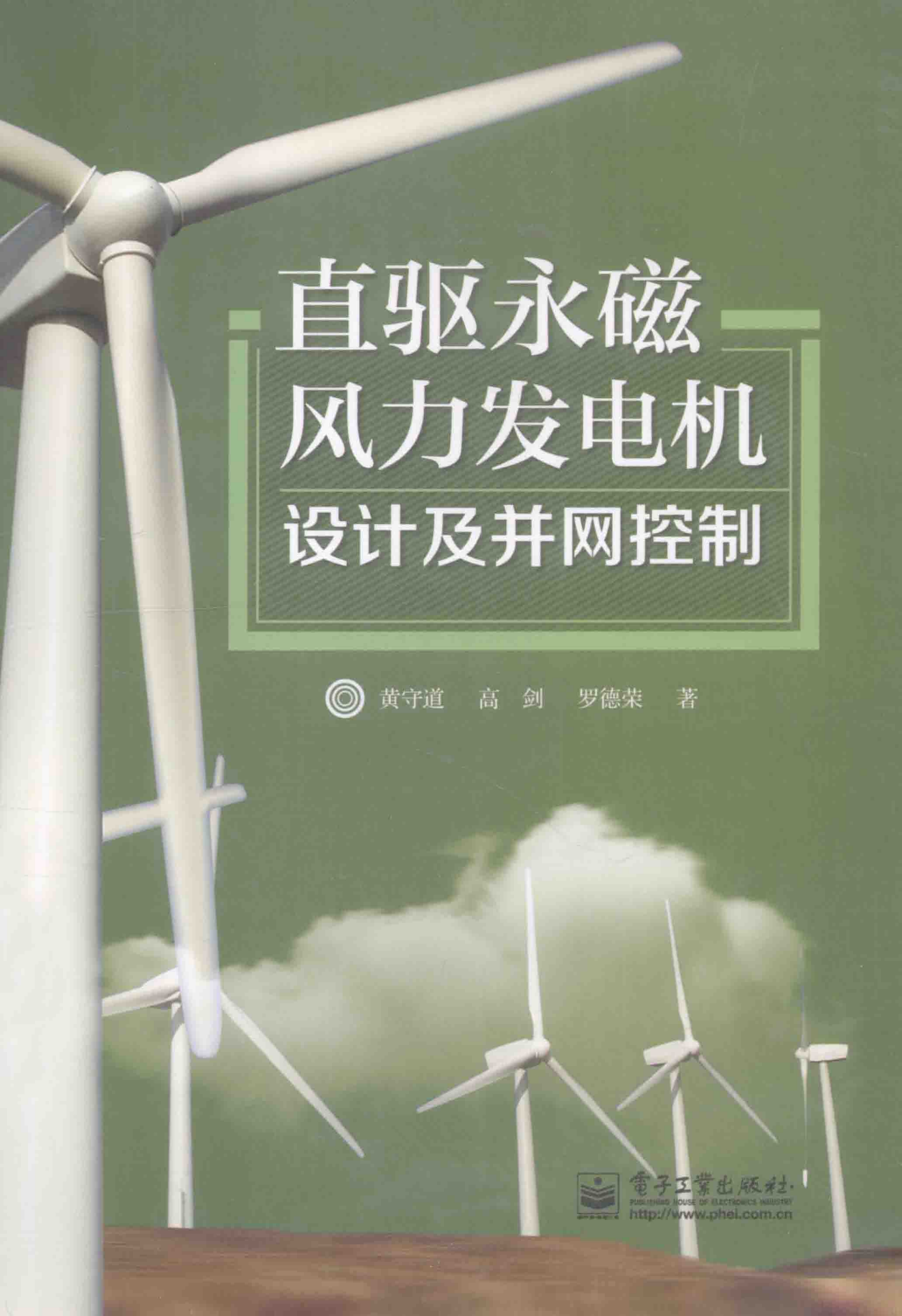


The background of the cover is a photograph of a wind farm. In the foreground, a large white wind turbine is partially visible, with its blades extending towards the top left. In the background, several other smaller wind turbines are visible against a greenish sky with some white clouds. The overall color palette is dominated by greens and whites.

直驱永磁 风力发电机 设计及并网控制

© 黄守道 高 剑 罗德荣 著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

直驱永磁风力发电机 设计及并网控制

黄守道 高 剑 罗德荣 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

本书主要内容涉及直驱永磁型变速恒频风力发电系统的运行控制基础,直驱永磁风力发电机系统的建模和控制技术,永磁同步风力发电机原理、系统化匹配设计技术和齿槽转矩削弱技术,理想电网条件下永磁同步风力发电系统的矢量控制,以及有功、无功功率解耦调节和最大风能捕获追踪运行。书中还就对称电网故障下直驱永磁风力发电系统的低电压穿越运行,小值不平衡电网故障下 PMSG 的运行理论,直驱永磁风电机组在电网电压不对称下的穿越运行,电网故障下锁相环技术,同时还对电网电压正常与故障下的预测直接功率控制技术作了深入探讨,完善了并网型直驱永磁风力发电系统的基础理论、设计方法与运行控制策略等方面的研究。

本书可作为新能源开发及风电技术专业的研究生教材,也可供从事风电产品研发、生产制造和运行管理的研究人员及工程技术人员参考。

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

直驱永磁风力发电机设计及并网控制/黄守道,高剑,罗德荣著. —北京:电子工业出版社,2014.12

ISBN 978-7-121-25323-2

I. ①直… II. ①黄… ②高… ③罗… III. ①永磁发电机—风力发电机—设计 IV. ①TM313②TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 310226 号

责任编辑:曲 昕

印 刷:北京京师印务有限公司

装 订:北京京师印务有限公司

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:17 字数:435 千字

版 次:2014 年 12 月第 1 版

印 次:2014 年 12 月第 1 次印刷

定 价:56.00 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

大力发展清洁能源和可再生能源是我国调整能源结构、缓解能源与环境矛盾的重要战略。风力发电是各种可再生能源中最具有商业化和产业化发展的重要领域。近十年来,我国风力发电产业得到了迅猛的发展,截至2014年底我国风电装机达到9800多万千瓦,居世界第一。直驱永磁风力发电系统具有直接驱动、高效、高可靠性等显著特点,是并网风力发电技术的发展趋势,近十年来发展迅速。

兆瓦级低速永磁发电机是直驱永磁风力发电机组的核心部件。由于发电机结构尺寸大,通过变流器并网运行,因此电机在电磁设计理论和模型以及并网运行控制方面与传统的直接并网型同步发电机有很大区别。

为促进直驱永磁风力发电机性能的进一步提高和有关设计及控制理论的进一步完善,特将湖南大学风力发电研究团队近十年从事直驱永磁风力发电机研究和开发的科研成果进行整理和总结。期望本书的出版能对我国直驱永磁风力发电机的进一步发展做出贡献。

本书共分5章,主要对直驱式永磁同步风力发电系统运行原理、直驱永磁风力发电机电磁设计理论与方法、齿槽转矩削弱方法、电网故障下直驱永磁风力发电机的控制方法,以及直驱永磁风力发电机直接功率控制方法进行研究和探讨。本书可作为从事风力发电机组,特别是直驱型风力发电机组研发、生产和管理的研究人员、技术人员的参考用书,同时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团队黄守道教授、高剑老师、罗德荣副教授共同撰写。黄科元博士、肖磊博士、邓秋玲博士、刘婷博士、张越雷博士和叶虹志硕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家自然科学基金、国家科技支撑计划、湖南省科技重大专项和国家科技国际合作专项等项目的资助,在本书撰写过程中得到了湘电集团有限公司的大力支持,在此一并表示感谢。特别感谢中国工程院顾国彪院士、丹麦奥尔堡大学陈哲教授对本书的指导意见。

由于时间和水平有限,对于本书中存在的错误和不妥之处,恳请广大读者不吝指正。

著者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 风力发电技术背景	1
1.1.1 风力发电的发展概况	1
1.1.2 风力发电系统的主要类型及发展现状	3
1.1.3 风力发电技术主要发展趋势	6
1.2 直驱永磁同步风力发电系统的拓扑结构	7
1.3 直驱永磁风力发电机及其设计技术研究现状	9
1.3.1 直驱永磁风力发电机的主要类型	9
1.3.2 永磁电机设计与分析方法	11
1.3.3 永磁风力发电机研究现状	12
1.4 直驱永磁同步风力发电机控制方法研究现状	14
1.4.1 理想电网条件下直驱永磁同步发电机控制方法	14
1.4.2 电网故障下直驱永磁风力发电机控制方法	16
参考文献	18
第 2 章 直驱永磁风力发电系统运行原理	22
2.1 直驱永磁风力发电系统的结构及基本原理	22
2.2 直驱永磁风力发电系统建模	23
2.2.1 风力机原理及特性	23
2.2.2 直驱永磁发电机建模	25
2.2.3 机侧 PWM 变流器的数学模型	33
2.2.4 网侧 PWM 变流器的数学模型	35
2.3 直驱永磁风力发电系统的控制	38
2.3.1 机组功率控制策略	38
2.3.2 机侧变流器控制策略	42
2.3.3 网侧变流器控制策略	49
2.3.4 直驱永磁同步风力发电系统的仿真分析	53
2.4 直驱永磁风力发电系统并网控制	71
2.4.1 风力发电系统并网要求	71
2.4.2 直驱永磁风力发电系统并网过程	74
参考文献	74
第 3 章 直驱永磁风力发电机的运行特性与电磁设计	76
3.1 PWM 变流器控制下直驱永磁风力发电机运行特性	76
3.1.1 PWM 变流器对直驱永磁风力发电机的约束分析	76
3.1.2 $i_{sd}=0$ 控制策略下直驱永磁风力发电机运行特性	77

3.1.3	恒端电压控制策略下直驱永磁风力发电机运行特性	79
3.1.4	单位功率因数控制策略下直驱永磁风力发电机运行特性	80
3.2	直驱永磁风力发电机参数化分析	82
3.2.1	极数对直驱永磁风力发电机的影响	82
3.2.2	极数/槽数匹配对直驱永磁风力发电机的影响	89
3.2.3	磁极参数对直驱永磁风力发电机的影响	92
3.2.4	匝数对直驱永磁风力发电机的影响	101
3.3	变流器约束下直驱永磁风力发电机的电磁设计	104
3.3.1	经典同步发电机设计与分析方法	104
3.3.2	PWM 整流器控制下直驱永磁风力发电机的系统化设计方法	106
3.3.3	直驱永磁风力发电机设计实例	109
3.3.4	2MW 直驱永磁风力发电机仿真分析	121
3.3.5	直驱永磁风力发电机试验	128
3.4	直驱永磁风力发电机齿槽转矩及其削弱	131
3.4.1	永磁电机齿槽转矩产生机理及削弱原理	131
3.4.2	齿槽转矩削弱的基本方法	136
3.4.3	基于重复单元磁极偏移的齿槽转矩削弱方法	145
	参考文献	159
第 4 章	电网故障下直驱永磁风力发电机组的运行	160
4.1	电网电压对称跌落下直驱永磁风力发电机组的控制	160
4.1.1	电网电压跌落概念	160
4.1.2	电网电压跌落对直驱永磁风力发电机组的影响	162
4.1.3	直驱永磁风力发电机组低电压穿越措施	164
4.1.4	其他辅助策略	172
4.1.5	电压跌落检测方法	173
4.2	电网电压小值不平衡下直驱永磁风力发电机组的控制	174
4.2.1	电网电压小值不平衡时网侧变流器的建模	175
4.2.2	不平衡分量正负序分解	178
4.2.3	直驱型永磁风力发电系统的电网同步化方法	180
4.2.4	电网电压小值不平衡时网侧变流器的控制	183
4.2.5	直流侧母线电压二倍电网频率稳态波动条件下机侧变流器的控制	192
4.3	电网电压不对称故障下直驱永磁风力发电机组的控制	194
4.3.1	电网电压不对称故障下直驱永磁风力发电机组的控制	195
4.3.2	仿真分析	202
4.3.3	实验分析	210
	参考文献	216
第 5 章	直驱永磁风力发电系统的直接功率控制	217
5.1	瞬时功率理论	217
5.1.1	电功率理论的概念及其发展过程	217

5.1.2	传统电功率定义	218
5.1.3	瞬时功率定义与计算	221
5.2	传统直接功率控制策略	223
5.2.1	基于电压定向的直接功率控制 (V-DPC)	223
5.2.2	基于虚拟磁链定向的直接功率控制	228
5.3	预测直接功率控制策略	234
5.3.1	预测控制概述	234
5.3.2	网侧变流器模型预测直接功率控制	235
5.3.3	无差拍预测直接功率控制	237
5.4	直驱永磁风力发电系统的直接功率控制	245
5.4.1	理想电网条件下直驱永磁风力发电系统的直接功率控制	245
5.4.2	电网不对称故障下直驱永磁风力发电系统的直接功率控制	253
	参考文献	261

第 1 章 绪 论

1.1 风力发电技术背景

1.1.1 风力发电的发展概况^[1-6]

风是地球上由太阳辐射热引起的一种自然现象。据估计到达地球的太阳能中虽然只有大约 2%转化为风能，但其总量仍是十分可观的。全球的风能约为 $2.74\times10^6\text{GW}$ ，其中可利用的风能为 $2\times10^4\text{GW}$ ，比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍。风能的利用主要为动力和风力发电两种形式，其中又以风力发电占主导地位。

风力发电以其清洁、无污染、建设周期短、运营成本低等优点，现已成为发展新能源和可再生能源的重点领域。近年来世界风力发电发展十分迅速，表 1.1 及表 1.2 给出了全球风能理事会（GWEC）统计的 2013 年全球新增装机容量及累计装机容量前 10 位的国家。数据表明，截至 2013 年年底欧洲地区风电装机总量达到 121.474GW，占全球风电装机总量的 38.2%；亚洲地区风电装机总量达到 115.939GW，占全球风电装机总量的 36.4%；北美地区风电装机总量达到 70.885GW，占全球风电装机总量的 22.3%。截至 2013 年年底全球风电累计装机容量达到 31 8137MW，同比增长 12.4%，在经济不景气的大背景下，这样的增长率对任何一个行业来讲都是相当不错的，尽管它低于过去十年约 28%的年平均增长率。全球风电市场的主要增长动力源自亚洲。2013 年亚洲地区风电新增装机容量为 18 228MW，占全球年度新增装机总量的 51.4%。欧洲虽然市场发展平缓，但依然在以满足到 2020 年可再生能源使用达到能源总消费 20%为目标的道路上稳步前进。欧洲海上风电装机近几年发展强劲，德国、西班牙等国

表 1.1 截至 2013 年 12 月全球累积装机容量前 10 位国家

国 家	2013 年年底累计装机容量（MW）	所占百分比（%）
中国	91 424	28.7
美国	61 091	19.2
德国	34 250	10.8
西班牙	22 959	7.2
印度	20 150	6.3
英国	10 531	3.3
意大利	8 552	2.7
法国	8 254	2.5
加拿大	7 803	1.5
丹麦	4 772	1.7
其他国家	48 352	15.2
前十总计	269 785	84.8
世界总计	318 137	100

表 1.2 截至 2013 年 12 月全球新增装机容量前 10 位国家

国 家	装机容量 (MW)	所占百分比 (%)
中国	16 100	45.4
德国	3 238	9.1
英国	1 883	5.3
印度	1 729	4.9
加拿大	1 599	4.5
美国	1 084	3.1
巴西	948	2.7
波兰	894	2.5
瑞典	724	2.0
罗马尼亚	695	2.0
其他国家	6 573	18.5
前十总计	28 894	81.5
世界总计	35 467	100

的风电增长很突出，这反映出其对可再生能源强烈的发展信心。正如在过去几年表现出来的，当中国风电市场上两位数和三位数增长的时代行将结束时，2013 年中国风电新增装机容量为 16.1GW，占全球新增装机总量的 45.4%，世界风能协会预测，中国仍将保持世界最大风电市场的地位。

我国作为能源消耗的大国，当前能源和环境问题日益制约着经济的快速发展，大力发展、利用可再生能源已成为我国各级政府的共识。《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》中明确提出要大力开展“可再生能源低成本规模化开发利用”和“发展海上风力发电”^[3]，国家发改委在 2009 年 3 月公布的“关于组织实施可再生能源和新能源高技术产业化专项的公告”中明确指出风力发电是“可再生能源和新能源高技术产业化专项重点领域”。据初步统计，2013 年中国新增风电装机容量 16GW，总装机容量达到 91.4GW，中国已经是世界上风电设备制造大国和风电装机容量最多的国家，成为名副其实的风电大国。为了推动风力发电的发展，中国国家能源局在风力资源丰富的主要 7 个风电基地设置了其未来 10 年的发展目标。根据规划到 2020 年主要风电基地装机容量将增加到 138GW（见表 1.3）。

表 1.3 2010—2020 年我国主要风电基地装机容量发展目标（单位：GW）

风电基地	2010（已安装）	2015（计划）	2020（计划）
河北	4 160	8 980	14 130
内蒙古东部	4 211	13 211	30 811
内蒙古西部	3 460	17 970	38 320
吉林	3 915	10 115	21 315
江苏	1 800	5 800	10 000
甘肃酒泉	5 160	8 000	12 710
新疆哈密	0	5 000	10 800
总量	22 706	69 076	138 086

从国内、外近年来风力发电迅猛发展的现状与未来趋势看,风力发电技术也必须获得相应的发展,以满足日益增长的市场需求。

1.1.2 风力发电系统的主要类型及发展现状

风力发电系统种类很多,每种结构都不尽相同。根据风力发电机组转速是否恒定,风力发电系统主要分为定速风力发电系统和变速风力发电系统两大类。

1.1.2.1 定速风力发电系统

定速风力发电系统由风轮机、齿轮变速箱、异步发电机、电容和变压器构成,其结构图如图 1.1 所示,这种典型结构的风力发电系统由丹麦风力发电机组制造商在 20 世纪八九十年代研制,并由于结构简单在当时应用得相当成功,因此也称为“丹麦型”风力发电机组。由于使用的是异步发电机,需要在定子绕组出线端接入电容以提供无功励磁电流,因此该系统功率因数较低。又由于是定速运行,捕获风能的能力较差,机组容量很难扩大,单机容量维持在 1MW 左右,使用的异步发电机主要有 4/6 极、600kW 和 125kW 双速异步发电机和 4 极 750kW、800 kW、850 kW、1 300 kW 单速异步发电机。

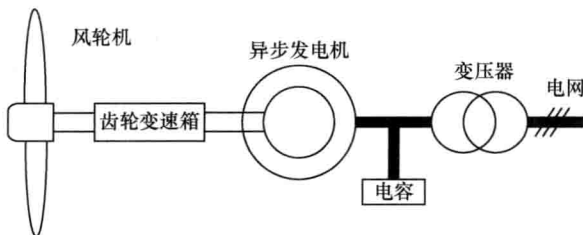


图 1.1 定速异步发电系统结构图

1.1.2.2 变速风力发电系统

目前 MW 级并网型风力发电系统都采用变速机型,这样可以实现变速恒频发电和最大风能的跟踪。变速型风力发电系统可以按照两个标准进一步分类:按照有无齿轮箱增速:可分为直驱、半直驱和多级增速型;按照所用功率变换器与发电机容量的大小关系,可分为全功率变流型和部分功率变流型,表 1.4 列出了变速型风力发电系统的主要机型。

表 1.4 变速型风力发电系统主要机型

类 型	齿轮箱类型	发电机类型
直 驱	无齿轮箱	永磁同步发电机
		电励磁同步发电机
半直驱	中速齿轮箱	永磁同步发电机
		双馈发电机
多级增速型	高速齿轮箱	永磁同步发电机
		双馈发电机
		笼型发电机

1. 直驱风力发电系统

直驱风力发电系统取消了齿轮箱,整个发电系统的效率和可靠性得到了极大提高,但是

机组运行转速低,最低运行转速可达几转/分,发电机结构尺寸大;由于是变速运行,因此发电机与电网之间还需要一个交—直—交全功率变流器。直驱永磁风力发电系统和电励磁风力发电系统结构图如图 1.2 和图 1.3 所示,其中电励磁系统比永磁系统多需要一组励磁装置。

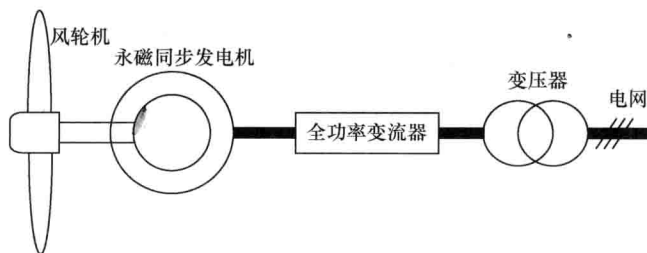


图 1.2 直驱永磁同步风力发电系统结构图

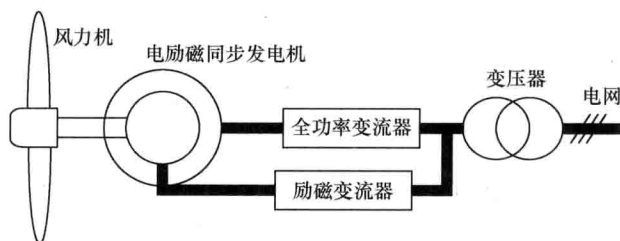


图 1.3 直驱电励磁风力发电系统结构图

目前市场上直驱永磁风力发电机组以 1.5MW 和 2MW 为主,国内厂商主要是湘潭电机股份有限公司和新疆金风科技股份有限公司。表 1.5 列出目前大功率直驱永磁风力发电机组的研制情况,部分机型现场安装运行如图 1.4 所示。

表 1.5 国内外正在研制的直驱风力发电机组

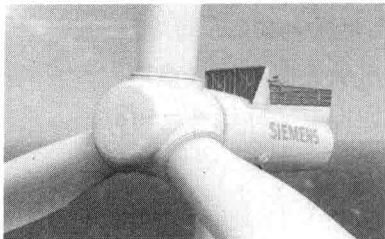
整机厂家机型	额定功率 (MW)	所处阶段
Alstom Haliade150-6MW	6	设计研制
Siemens 6 MW	6	样机试验
Enercon E-126	7	产品试验
GE 风能 GE4.1-113	4.1	样机研制
金风 6MW	6	样机试验
湘电 5MW	5	产品试运行

2. 多级增速风力发电系统

多级增速风力发电系统在风力机与发电机之间增加了一个 3 级增速齿轮箱,将风力机的转速提高到了发电机同步速附近(4 极发电机为 1 500 r/min),因此风力发电机的体积可以大大缩小,但是由于齿轮箱的加入,加大了系统的维护率和故障率。最典型的多级增速风力发电系统是双馈风力发电系统,它使用的风力发电机为双馈风力发电机,其定子直接接入电网,转子通过一个功率变换器与电网相连,通过控制转子电流的幅值和频率,实现变速恒频发电,由于变流器接在转子侧,只需要转换转差功率,因此变流器容量相对发电机容量较小,一般为发电机容量的 30%~40%。双馈风力发电系统结构图如图 1.5 所示。



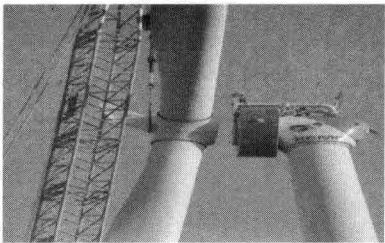
Alstom 6MW



Siemens 6 MW



金风6MW



湘电5MW

图 1.4 直驱永磁同步风力发电系统现场安装运行图（续）

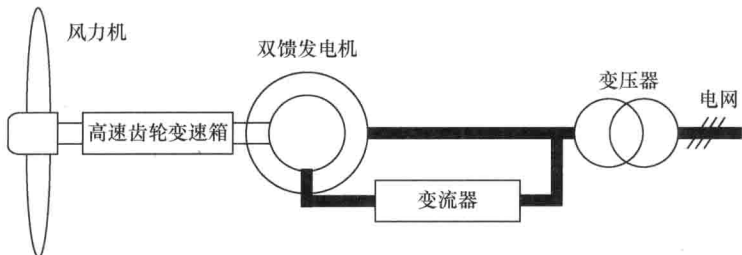
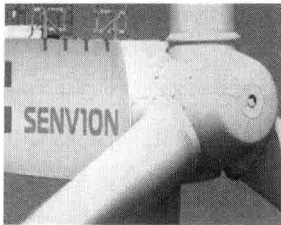


图 1.5 双馈风力发电系统结构图

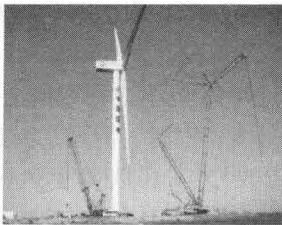
现有市场上的双馈风力电机机组主要以 1.5MW 为主，国内许多厂商都有此类产品，如国电联合动力技术有限公司和华锐风电科技集团等。表 1.6 列出了目前大功率双馈式风电机组的研制情况，现场安装运行如图 1.6 所示。

表 1.6 国内外正在研制的双馈风力发电机组主要机型

整机厂家机型	额定功率（MW）	所处阶段	整机厂家机型	额定功率（MW）	所处阶段
SENVION 6MW	6	产品试运行	华锐 6MW	6	产品试运行
国电联合动力 6 MW	6	样机下线	上海电气	3.6	产品试运行



SENVION 6MW



国电联合动力6MW



华锐6MW

图 1.6 双馈风力发电机组实物图

3. 半直驱风力发电系统

半直驱风力发电系统只采用一级或两级齿轮增速，例如 1:20 增速齿轮箱，这种技术可以使齿轮箱和发电机的体积都有所减小，是直驱风力发电和多级增速风力发电方案之间的折中选择。图 1.7 为半直驱永磁风力发电系统结构图。

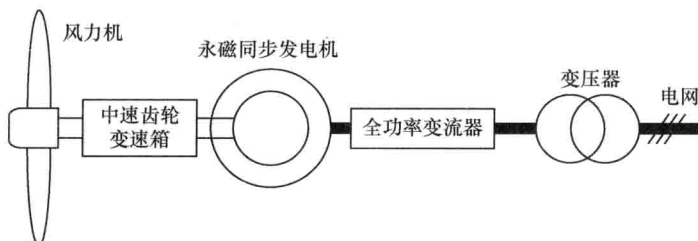


图 1.7 半直驱永磁风力发电系统结构图

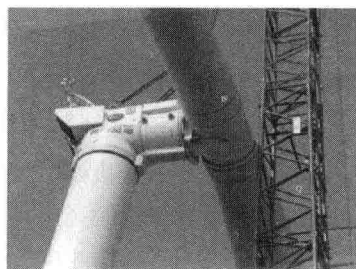
目前国内生产半直驱风电机组的厂家主要有明阳风电集团等。表 1.7 列出了部分半直驱风力发电机组的研制情况。图 1.8 为部分半直驱风力发电机组的现场安装运行图。

表 1.7 半直驱机组主要机型

整机厂家机型	额定功率 (MW)	所处阶段
VESTAS V164	8	设计研制
Gamesa G128-4.5MW	4.5	样机试验
明阳 SCD	6	样机试验



VESTAS 8MW



明阳SCD 6MW

图 1.8 半直驱风力发电机组实物图

1.1.3 风力发电技术主要发展趋势

随着各国政策的倾斜和科技的不断进步，世界风力发电发展迅速，展现出了广阔的前景。未来数年世界风力发展的趋势如下：

(1) 海上风能资源丰富，且受环境影响小，利用海上的风能资源来建立海上风电场将成为世界各国风能利用的重点。目前丹麦、德国、英国、瑞典和荷兰等国家海上风电发展较快。欧洲风能协会 (EWEA) 预测，到 2020 年，欧洲海上风电总装机容量将达到 70GW^[4]。而海上风电场建设亦成为我国风力发电建设的重中之重。

(2) 风电机组单机容量的不断增大。毫无疑问，单机容量的增大将会提高风能利用率，减小风电场的使用面积，从而降低运行与维护的成本，大大提高风电在电网中的市场竞争力。目前我国兆瓦级风力发电系统已实现商业化运行，其中 1.5MW 与 2MW 风电机组是目前的主

力机型, 5~8MW 风电机组已处于样机研制和样机运行阶段, 10MW 及更大单机容量的风电机组也处于紧张研制阶段。未来风力发电单机容量将进一步增大, 随着各项技术的成熟, 更大容量的风力发电机组将从实验室走向商业应用。

(3) 在方案与技术方面, 更多的创新拓扑及技术被不断被采用, 变速恒频技术和变桨距调节技术将被更多地应用于功率调节; 在发电机类型上, 控制灵活的双馈式感应发电机、结构简单的永磁发电机, 以及成本低廉的鼠笼型感应发电机成为风力发电的新宠; 在并网技术方面上, 随着变流新技术的发展, 不断的提高着并网变流器性能; 在控制技术上, 计算机分布式控制技术和新的控制理论将进一步得到应用; 在驱动方式上, 免齿轮箱的直接驱动技术将更加吸引人们的注意。

(4) 将风力发电机与电网作为一个整体来实施运行控制成为目前风电机组控制的一个焦点。随着风电机组在电力系统中的增加和单机容量的快速提高, 发电机与电网之间的相互影响也越来越大, 必须将风力发电机与电网作为一个整体来实施运行控制。电网运营商从电网稳定的角度出发, 要求发电机组在电网故障时能够保持不脱网运行, 即风电机组的故障穿越能力。

1.2 直驱永磁同步风力发电系统的拓扑结构^[7-11]

发电机及其变流器控制系统是风力发电机组的关键部件, 这一关键部件的状况将决定着整个风力发电系统的性能。各国学者的研究表明, 当前风电技术发展的主要方向是变速恒频风力发电技术。

采用变速恒频发电技术的风力发电系统, 由于采用了不同类型的风力发电机, 并辅之相关的电力电子变流器, 配合风力发电机进行功率控制与调节, 就构成了形式多样的变速恒频风力发电系统, 如鼠笼型异步发电机变速恒频风力发电系统、同步发电机变速恒频风力发电系统、双馈风力发电机变速恒频风力发电系统、直驱永磁同步变速恒频风力发电系统等。目前双馈发电机为兆瓦级以上风力发电系统采用最多的一种拓扑形式。但随着风力发电机单机容量不断增加, 与海上风电的不断发展, 直驱永磁同步变速恒频风力发电系统获得了更大量关注与采用。

直驱永磁同步发电系统的主要优点有:

(1) 采用直驱型永磁同步发电机无需齿轮箱, 采用无刷结构。易于后期维护, 尤其是在海上风力发电场等场合;

(2) 发电机采用永磁同步发电机, 具有高效率、高功率密度、高可靠性等优点;

(3) 采用背靠背双 PWM 变流器并网, 电机转速变化范围很宽, 将发电机和电网隔离, 机组的故障穿越运行能力更强。

全功率变流器控制系统是直驱永磁同步风力发电的关键技术之一, 永磁同步发电机输出的频率变化的低频交流电被背靠背全功率变流器转换成频率固定的工频电馈入电网。经过多年的发展, 当前采用的直驱永磁同步发电机组主要采用全功率变流器拓扑, 归纳起来主要有四种:

(1) 机侧采用不控整流, 网侧 PWM 逆变, 如图 1.9 所示, 电机定子输出端接三相二极管整流桥进行不控整流, 直流侧采用电感电容滤波, 网侧逆变器把直流侧电能逆变成工频交流电馈入电网。这种方式只有当发电机电线电压的峰值高于直流母线电压, 发电机才能馈出电

能,而直流母线电压的最小值已经由电网电压决定,因此发电机运行电压须设计较高的输出电压,从而对变流器所使用的电力电子器件耐压提出很高的要求,导致系统成本大为增加,降低了整机效益。由于采用二极管不控整流,能量不能双向流动,同步发电机不可控,最大功率跟踪不易实现。同时采用二极管不控整流,电机定子电流存在很大的低次谐波成分,发电机的铜耗和铁耗较大,降低了发电机的效率。这种拓扑缺陷明显,很少被采用。

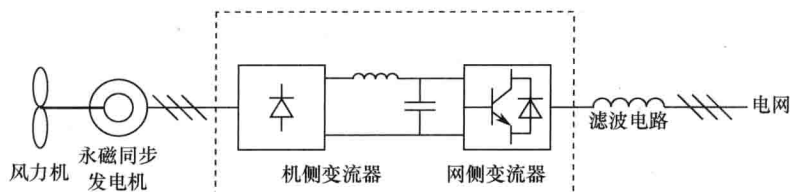


图 1.9 采用不可控制整流的永磁直驱变流器

(2)机侧不控整流+boost 升压,网侧 PWM 逆变,如图 1.10 所示,能量经由不可控 AC/DC 变流器到达直流侧,由于风速的变化,导致了直流侧电压的波动,采用升压变流器将 DC/AC 变流器直流母线侧电压稳定控制,然后通过 DC/AC 变流器逆变并网。这种电路结构的成本较低,但是它不具备四象限运行的能力,且电机侧由于不控整流导致机侧谐波增大影响电机运行和效率,因而在运行中受到很大的限制,并且当系统功率较大时,大功率的 BOOST 升压电路设计困难。但是,这种拓扑因为成本相对较低,在当前直驱风力发电工程中得到较多应用。

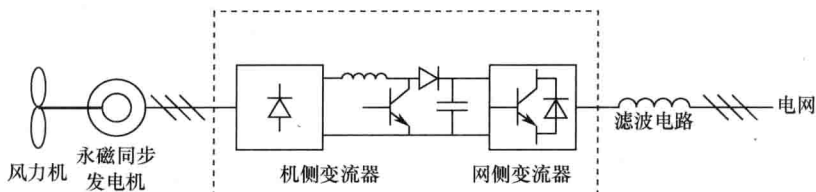


图 1.10 采用不可控制整流+boost 升压的永磁直驱变流器

(3)机侧采用相控整流,网侧 PWM 逆变,如图 1.11 所示,这种方式与上两种方式相比,由于晶闸管的导通时间可以通过触发角控制,一定程度上可以抑制电流,保护直流母线防止过压,实现的机侧可控,成本较低。但是机侧低次谐波较大的缺点依然没有改善。因此实际系统中此种拓扑结构很少被采用。

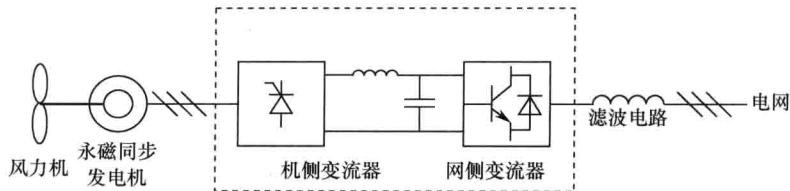


图 1.11 机侧采用相控整流的永磁直驱变流器

(4)具备四象限运行能力的双 PWM 控制的功率变流器(图 1.12)。同二极管不控整流相比,机侧变流器采用 PWM 整流可以大大减少发电机定子电流谐波含量,从而降低了发电机的铜耗和铁耗,并且 PWM 整流器可提供几乎为正弦的电流,因而减少了发电机侧的谐波

电流。通过控制系统的控制,将永磁电机发出的变频变幅值电压转化为可用的恒频电压,并达到俘获最大风能的目的。这也是一种技术最先进、适应范围最为广泛的方案,代表着目前的发展方向,也是本文主要研究的拓扑结构。

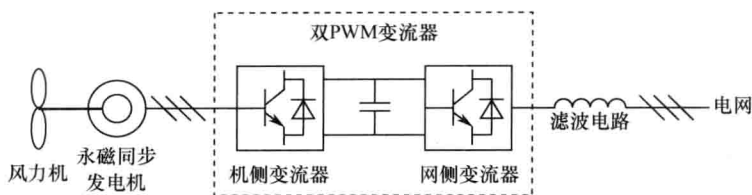


图 1.12 背靠背双 PWM 永磁直驱变流器

背靠背双 PWM 变流器直驱永磁同步风力发电机,由风力机、永磁同步发电机、背靠背双 PWM 变流器和滤波电路组成。永磁同步发电机的转子不接齿轮箱,直接和风力机相连。定子绕组经过四象限变流器和电网相连。背靠背双 PWM 变流器由机侧变流器和网侧变流器组成,可实现能量双向流动,机侧变流器可实现对永磁同步发电机的转速/转矩进行控制,网侧变流器实现对直流母线进行稳压控制。

所谓的直驱永磁同步变速恒频风力发电就是由永磁同步发电机与双 PWM 变流器这样的拓扑来实现的。永磁同步发电机永磁转子在定子绕组产生感应反电动势,反电动势和转速成正比,同样定子端电压随着转速的变化而产生幅值与频率的变化。经过机侧变流器的 PWM 整流作用,永磁同步发电机产生的电能被变流器由交流量转换成直流量并传输到网侧变流器,网侧 PWM 变流器再将表现为直流量的能量逆变成与电网同频率、同幅值的交流量。

1.3 直驱永磁风力发电机及其设计技术研究现状

1.3.1 直驱永磁风力发电机的主要类型^[12-14]

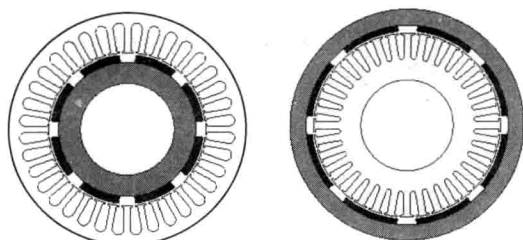
永磁同步发电机按照其磁通方向可分为径向磁通永磁电机、轴向磁通电机以及横向磁通电机。

(1) 径向磁通永磁电机

径向磁通永磁电机(RFPM)中导体电流呈轴向分布,主磁通沿径向从定子经气隙进入转子,这是最常规最普通的永磁电机形式。径向磁场式电机具有结构简单、制造方便、漏磁小等优点,应用非常广泛。

径向磁通永磁电机按照转子磁路结构可分为表面式、内置式及爪极式。表面式电机永磁体直接面向气隙,而内置式电机永磁体则嵌在转子中;按照永磁体磁化方向可分为径向式、切向式以及混合式;按照转子位置可分为内转子与外转子电机。传统的径向磁通电机大多为内转子设计,如图 1.13 (a) 所示,该结构使得定子绕组和铁心具有较好通风冷却性能,温度低。而外转子结构的电机,如图 1.13 (b) 所示,这种电机具有永磁体安装方便、转子可靠性好和大的转动惯量等优点,缺点是电枢铁心和绕组通风效果不佳。

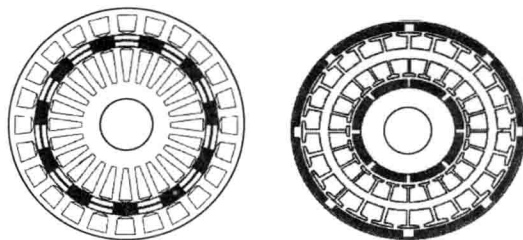
径向电机也可以做成多转子或多定子复合结构,电机有多个气隙,与单定子或者单转子电机相比,复合结构电机体积小、重量轻,电机转矩密度更高。图 1.14 分别为单定子双转子与双定子单转子这两种复合结构电机结构的示意图。



(a) 内转子结构

(b) 外转子结构

图 1.13 常规径向磁通电机结构



(a) 双定子结构

(b) 双转子结构

图 1.14 复合径向磁通电机结构

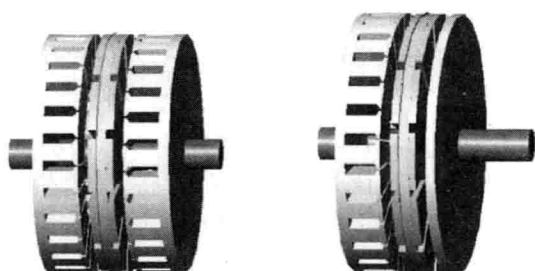
(2) 轴向磁通电机

轴向磁通电机 (AFPM) 的气隙磁场是轴向的, 与径向磁通电机相比, 磁路长度短些。电机外形扁平, 定转子为圆盘形状, 又叫盘式电机。扇形或圆柱形的永磁体按 N、S 极性交替粘在转子盘上。永磁磁极的磁化方向沿电机轴向, 电机的气隙是一个沿径向的平面形, 有效磁通沿轴向通过气隙。绕组位于电机端面, 有效导体的方向为径向, 绕组散热条件好。与传统径向磁场永磁电机相比, 轴向磁通电机具有结构紧凑、重量轻、转矩和功率密度高等优点。尤其采用多定子或多转子的多气隙结构时, 电机的转矩和功率密度更高, 如图 1.15 (a) 所示。由于轴向磁通电机所具有的特殊优势, 使其在各个领域范围都有广泛的应用。

当如图 1.15 (b) 所示永磁体结构轴向不对称时, 存在轴向磁拉力, 使轴承负荷加大, 需要使用推力轴承避免转子发生轴向移动。

(3) 横向磁通电机

横向磁通电机 (TFPM) 是德国的 H.Weß 教授发明的, 是一种与传统结构轴向磁通电机和径向磁通电机不同的新型电机。电枢线圈与定子齿槽结构在空间上是相互垂直的, 电机主磁通流通方向为沿着电机旋转方向与转轴方向, 其结构如图 1.16 所示。传统电机在增加气隙磁通与绕组电流密度之间在结构上存在相互制约的关系。而横向磁通电机则不同, 其主磁路与电枢绕组在结构上是完全解耦的, 定子尺寸与绕组线圈结构相互独立。因此在设计电机时电磁负荷的确定可通过对磁路尺寸的调整、线圈的匝数的改变或者线规的选取来实现。横向磁通有利于提高系统的可靠性、容错能力与寿命, 同时具有转矩密度高、体积小、重量轻的优点。横向磁通电机为三维磁路, 拓扑结构丰富, 设计空间非常广阔。



(a) 双定子结构

(b) 单定子结构

图 1.15 轴向磁通电机结构

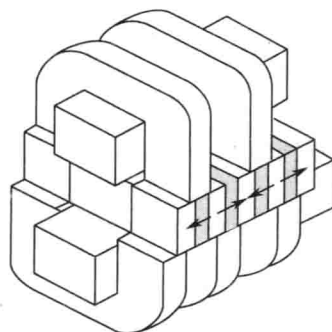


图 1.16 横向磁通电机结构

但是该电机电机结构复杂, 要求较高的制造工艺水平, 因此电机的成本也很高。另外, 电机的功率因数不高, 需要提高驱动变换器的功率等级, 很多问题都需要解决。