



新 能 源 技 术 丛 书

风能

技术与应用

钱伯章 编



科学出版社
www.sciencep.com

新能源技术丛书

风能技术与应用

钱伯章 编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是“新能源技术丛书”之一。本书详尽介绍了世界风能领域的发展现状与前景,评述了国内外在这一领域的最新科技成果。主要内容包括风力发电技术概述、风力发电发展现状与展望、风力发电应用进展、世界风机制造行业评述、风力发电设备和材料技术的发展、风力发电新技术和新设备、中国风力发电应用进展与展望、中国风电产业发展。

本书可用作从事能源以及风能领域的规划、科研、生产和信息管理人员的工作指南用书,也可供国家决策机构人员和相关人员参阅,并可作为各大院校环境及相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

风能技术与应用/钱伯章 编. —北京:科学出版社,2010.6

(新能源技术丛书)

ISBN 978-7-03-027805-0

I. 风… II. 钱… III. 风力能源-利用 IV. TK81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 100796 号

责任编辑:孙力维 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:郝恩誉

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京天时捷彩色印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 7 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010 年 7 月第一次印刷 印张: 12

印数: 1—4 000 字数: 224 000

定 价: 26.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

丛书序

世界可再生能源的资源潜力巨大,但由于成本和技术因素的限制,其利用率还很低。水能、生物质能的应用技术相对成熟;风能、地热能、太阳能得益于政策的支持,近年来发展比较迅速;对海洋能(包括潮汐能、波浪能、温差能、盐差能等)的利用尚处于研发和验证阶段,距大规模商业化应用还有一段距离。

当今世界各国都在为获取充足的能源而拼搏,并对解决能源问题的决策给予极大重视,其中可再生能源的开发与利用尤其引人注目。新技术的发展,使得风能、生物质能以及太阳能等可再生能源得到快速开发和利用。随着化石能源的日趋枯竭,可再生能源终将成为其替代品。

在国际油价持续上涨的背景下,风能、太阳能、生物质能等新能源有望成为全球发展最迅速的产业之一,中国的新能源产业也正孕育着更多的投资机会。

我国新能源与可再生能源资源丰富,可开发利用的风能资源约 2.53 亿 kW;地热资源的远景储量为 1353.5 亿 t 标准煤,探明储量为 31.6 亿 t 标准煤;太阳能、生物质能、海洋能等储量更是处于世界领先地位。在国际石油市场不断强势震荡,国内石油、煤炭、电力资源供应日趋紧张的形势下,开发利用绿色环保的可再生能源和其他新能源,已经成为中国能源发展的当务之急。中国国家能源领导小组描绘了可再生能源的诱人前景:到 2010 年,中国可再生能源在能源结构中的比例将提高到 10%;到 2020 年,将达到 16%左右。中国已出台《中华人民共和国可再生能源法》简称(《可再生能源法》),“十一五”规划中也明确提出要加快发展风能、太阳能、生物质能等可再生新能源。

以“为国家提供优质能源”为己任的中国石油天然气集团公司(简称中石油)、中国石油化工股份有限公司(简称中石化)、中国海洋石油总公司(简称中海油),除了进一步加快石油、天然气的开发速度外,也将目光投向了生物质能、太阳能发电、风能利用、地热、煤层气等新能源开发上。

中石油继在中国石油勘探与生产分公司成立新能源处之后,其可再生能源计划已经有多个项目进入实质阶段,有望于“十一五”期间首先在生物质能、太阳能发电、风能利用、地热开发等领域取得突破。虽然投资巨大与风险并存,但作为国内最大的石油、天然气生产商和供应商,中石油仍然积极探索开发利用可再生能源,目的是为我国经济和社会发展增加新的能源选择。2003 年,中石油与中粮集团有限公司(简称中粮集团)合资开发的吉林燃料乙醇项目成为“十五”重点建设工程,也是国家生物质能产业的试点示范工程。2006 年,中石油成立了新能源处和相应的研发机构,现已启动一批可再生能源项目。其中,在西藏那曲地区、辽河油田、新疆油田等地建设了一批光伏发电、风力发电、地热资源开发利用等示范项目,并取得良好效果。2006 年 11 月,中石

油与四川省政府签署了用红薯和麻风树开发生产乙醇燃料和生物柴油的合作协议。2006年12月,中石油与云南省政府签署框架协议,拟在以非粮能源作物为原料生产燃料乙醇、以膏桐等木本油料植物为原料制取生物柴油等方面进行合作。

中石化和中粮集团于2007年4月中旬签订合作协议,共同发展生物质能及生物化工,拟在五年内合作建设年产100万t~120万t燃料乙醇的生产装置,双方通过项目招标赢得了合资建设广西合浦20万t/a生物燃料乙醇项目;合作还将涉及生物化工领域,双方拟共同致力于生物化工制品的研究、开发、生产和应用并形成产品规模,以推动中国化工行业的进一步发展。

新能源基金会(NEF)和中国资源综合利用协会可再生能源专业委员会(CREIA)于2008年3月底发布了中国2007年前10项可再生能源开发现状报告,指出2007年中国光伏电池量(不包括中国台湾)已超过美国,继日本和德国之后位居世界第三位。

2008年,中国在投资可再生能源方面仅次于美国而居世界第二位,中国和美国的投资分别为1760亿美元和2000亿美元。据HSBC(汇丰银行)估算,中国经济刺激计划投入绿色项目的资金达2210亿美元,为美国的两倍多,相当于中国2008年GDP的5%。

在《可再生能源法》及《可再生能源中长期发展规划》等推动下,中国可再生能源已步入快速发展阶段。截至2007年底,可再生能源占中国一次能源供应的8.5%,电力供应的16%;2008年,可再生能源利用量约为2.5亿t标准煤,约占一次能源消费总量的9%,距离2010年可再生能源在能源消费结构中的比重占10%的目标仅有一步之遥。到2020年,可再生能源占一次能源供应和占电力供应的比例将分别达到15%和21%。

加快发展包括可再生能源在内的新能源,是时代赋予我们的重大责任和发展机遇。

本丛书以“中国走向世界,并融入世界”为主线,以可再生能源和其他新能源的技术与应用新进展为出发点,全面介绍太阳能、风能、水力能、海洋能、地热能、核能、氢能、生物质能醇醚燃料、天然气和煤基合成油、新能源汽车与新型蓄能电池以及热电转换技术等领域的技术发展、应用状况、研发成果、生产进展与前景展望。本丛书力求以最新的数据、最广的视角和最大的集成,使读者了解中国乃至世界在上述领域的新技术、新产能、新应用和新方向。

前 言

风能作为可再生能源的重要类别,具有蕴藏量巨大、可再生、分布广、无污染等特点,风力发电已成为世界可再生能源发展的重要方向。

世界风能协会(WWEA)发布的“世界风能报告”指出,2005年以来,风能行业与世界其他工业部门相比,创造了较多的就业机会,截至2009年,已有55万人从业于风能行业。WWEA预测,风电行业的从业人数2010年底将上升至67万人,预计2012年将达到100万人。

据WWEA统计,2009年全世界累计风电装机容量达到159GW,其中,2009年增加了38GW。而在10年前,全球风力发电设置能力只有4GW,目前达到了38GW,相当于近10倍的增长。

世界风能协会预计,全球风能市场将继续快速增长,世界风力发电能力在未来5年内,将增长160%,全球风力发电装机容量将在2014年达到409GW。

中国风能能力将继续以惊人的速度增长,2009年,中国占全球年度风能能力增加量的三分之一,新增风力发电场13GW,使总装机能力达到25.1GW,仅次于美国和德国,位居世界第三位。中国在未来数年内将继续是全球风能增长的主要动力之一,预计到2014年风能能力年增加量将超过20GW。

本书从全球视角出发,介绍了世界风力发电应用现状与展望、世界各国(地区)风力发电应用进展、世界风机制造行业发展现状和发展趋势、风力发电设备和材料技术进步、风力发电新技术和新设备、中国风力发电应用进展和展望等内容。

本书可用作从事能源以及风能领域的规划、科研、生产和信息管理人员的工作指南用书,也可供国家决策机构人员和相关人员参阅,并可作为各大院校环境及相关专业师生的参考用书。

目 录

第 1 章 风力发电技术概述	1
1.1 风能利用潜力	1
1.2 风力发电原理	1
1.2.1 风力发电原理概述	1
1.2.2 风力发电的核心技术	4
第 2 章 风力发电发展现状与展望	7
2.1 风力发电发展回顾	7
2.1.1 2004 年	7
2.1.2 2005 年	7
2.1.3 2006 年	8
2.1.4 2007 年	10
2.1.5 2008 年	11
2.1.6 2009 年	16
2.2 海上风能	18
2.2.1 概 述	18
2.2.2 海上风力涡轮技术开发	19
2.3 风力发电前景	20
第 3 章 风力发电应用进展	25
3.1 欧洲发展现状和展望	25
3.1.1 欧洲发展总览	25
3.1.2 德 国	27
3.1.3 法 国	29
3.1.4 英 国	30
3.1.5 西班牙	32
3.1.6 葡萄牙	34
3.1.7 挪 威	34
3.1.8 荷 兰	35
3.1.9 比利时	35
3.1.10 丹 麦	36
3.1.11 芬 兰	38

3.1.12	土耳其	38
3.1.13	意大利	39
3.1.14	爱尔兰	40
3.1.15	瑞典	40
3.1.16	波兰	41
3.1.17	东欧	42
3.1.18	俄罗斯	42
3.2	美国风力发电进展	43
3.2.1	风力发电现状和展望	43
3.2.2	近年风力发电项目建设	48
3.3	加拿大风力发电进展	56
3.3.1	概 述	56
3.3.2	项目建设	57
3.4	其他国家和地区风力发电进展	58
3.4.1	印 度	58
3.4.2	新西兰	59
3.4.3	澳大利亚	59
3.4.4	韩 国	60
3.4.5	日 本	60
3.4.6	哈萨克斯坦	61
3.4.7	越 南	62
3.4.8	巴基斯坦	62
3.4.9	巴 西	62
3.4.10	智 利	62
3.4.11	阿根廷	63
3.4.12	中 东	64
3.4.13	非 洲	64
3.4.14	其 他	66
第4章	世界风机制造行业评述	69
4.1	世界风电装机和设置发展态势	69
4.2	世界风电设备及制造发展趋势	72
4.3	全球风电机组技术发展趋势	73
第5章	风力发电设备和材料技术的发展	79
5.1	叶片材质的发展	79
5.1.1	概 述	79
5.1.2	叶片生产商简介	80

5.1.3 对风机叶片材料的要求与选择	80
5.1.4 复合材料风机叶片材料体系及制造工艺	84
5.1.5 风电机叶片材料的技术发展	89
5.2 碳纤维及其在风机叶片中的应用	92
5.2.1 碳纤维概述	92
5.2.2 碳纤维市场	92
5.2.3 碳纤维制造商产能及扩产计划	93
5.2.4 聚丙烯腈基碳纤维生产商与制造工艺	94
5.2.5 中国碳纤维发展现状与趋势	96
5.2.6 碳纤维在风力发电机叶片中的应用	101
5.3 润滑油和涂料技术进展	104
5.3.1 润滑油	104
5.3.2 涂 料	107
5.4 组件设备技术进展	109
5.5 风电基础技术进展	111
5.6 恶劣环境下风力发电设备的运输与安装	111
5.6.1 风力发电设备大型化带来的挑战	111
5.6.2 解决风力发电设备面临的具体问题	112
5.6.3 新技术及新产品	113
5.7 风机叶片的回收途径分析	113
5.8 风力发电场建设成本	114

第6章 风力发电新技术和新设备	117
6.1 新型蓄能发电站	117
6.2 小型风能涡轮	118
6.3 浮置式风力涡轮	119
6.4 创新的风力涡轮	121
6.5 新型垂直轴风力发电机	121
6.6 磁悬浮垂直轴风力发电机组	122
6.7 直接驱动风力涡轮	123
6.7.1 西门子能源公司创新的 3.6MW 直驱风力涡轮	123
6.7.2 中国引进荷兰 Emergya 风能公司技术	123
6.7.3 株洲南车电机公司首台 2.5MW 直驱永磁同步风力发电机	124
6.7.4 世界第一台兆瓦级半直驱风力发电机在深圳下线	124
6.8 风筝电站	125
6.9 多转子风力涡轮	128
6.10 智能风力涡轮叶片	129

6.11	隐形风力发电机	130
6.12	带有“风力加速器”的风力涡轮	131
6.13	美国 Clemson 大学开发新一代风力涡轮	131
第 7 章	中国风力发电应用进展和展望	133
7.1	中国风能资源	133
7.2	中国各地风力发电现状	135
7.2.1	中国风力发电现状与展望	135
7.2.2	中国各地风力发电进展	138
7.2.3	海上风能资源	154
第 8 章	中国风电产业发展	157
8.1	中国风电产业发展概况	157
8.1.1	中国风电制造商装机市场份额	157
8.1.2	中国风电制造业情况	160
8.2	中国风电装备发展良策	163
8.2.1	引进技术、消化吸收	163
8.2.2	改进改型、自主研发	164
8.2.3	风电质量控制	164
8.3	中国风力发电专利回顾统计	166
8.3.1	2008 年风电专利省市分布情况	166
8.3.2	2008 年风电专利申请人情况	166
8.3.3	2008 年风电专利国际专利分类情况	167
8.4	国外风电企业抢滩中国市场	167
8.5	中国风电企业发展现状与前景	170
8.5.1	国内风电机组产业迅速崛起	170
8.5.2	新型风电机组技术开发与应用	172
8.5.3	加快推进国产化进程	175
8.5.4	发展前景	176
8.6	风力发电成本	178
参考文献		179

第 1 章 风力发电技术概述



1.1 风能利用潜力

风能作为一种重要的可再生能源,是地球上最古老、最重要的能源之一,它具有蕴藏量巨大、可再生、分布广、无污染的特性,是世界可再生能源发展的重要方向。

目前,利用风力发电已成为风能利用的主要形式,受到世界各国的高度重视,而且发展速度非常快。

据世界风能协会的统计数据,在 10m 高空风能资源量有 10 亿 kW,是水能的 2 倍。

与热力发电设施不同,风力发电不需要冷却水,应用风力发电可使公用系统用水减少 17%,相当于不需再建设 80GW 新的燃煤电厂。风力发电没有燃料问题,也不会产生辐射或空气污染;而且从经济的角度讲,风力仪器比太阳能仪器要便宜九成多。

中国风能储量很大、分布面广,甚至比水能还要丰富。合理利用风能,既可减少环境污染,又可减轻越来越严重的能源短缺的压力。

根据国家气象科学院的估算,我国陆地地面 10m 高度层风能的理论可开发量为 32 亿 kW,实际可开发量为 2.53 亿 kW。海上风能可开发量是陆地风能储量的 3 倍。

风能还是极为清洁高效的能源。每 10MW 风电入网可节约 3.73t 煤,同时减少排放粉尘 0.498t、CO₂ 9.35t、NO_x 0.049t 和 SO₂ 0.078t。例如,2000 年,我国风力发电 9.65 亿 kW·h,共节煤 35 万 t;2002 年德国风力发电 170 亿 kW·h,节煤 442 万 t,减少 CO₂ 排放 1428 万 t。



1.2 风力发电原理

1.2.1 风力发电原理概述

风力发电有 3 种运行方式:一是独立运行方式,通常是一台小型风力发电机向一户或几户提供电力,它用蓄电池蓄能,以保证无风时的用电;二是风力发电与其他发电

方式(如柴油机发电)相结合,向一个单位、一个村庄或一个海岛供电;三是风力发电并入常规电网运行,向大电网提供电力,常常是一处风电场安装几十台甚至几百台风力发电机,这是风力发电的主要发展方向。

风力发电机(图 1.1)一般由风轮、发电机(包括装置)、调向器(尾翼)、塔架、限速安全机构和储能装置等构件组成。风力发电机的工作原理比较简单(图 1.2),风轮在风力的作用下旋转,它把风的动能转变为风轮轴的机械能。发电机在风轮轴的带动下旋转发电。

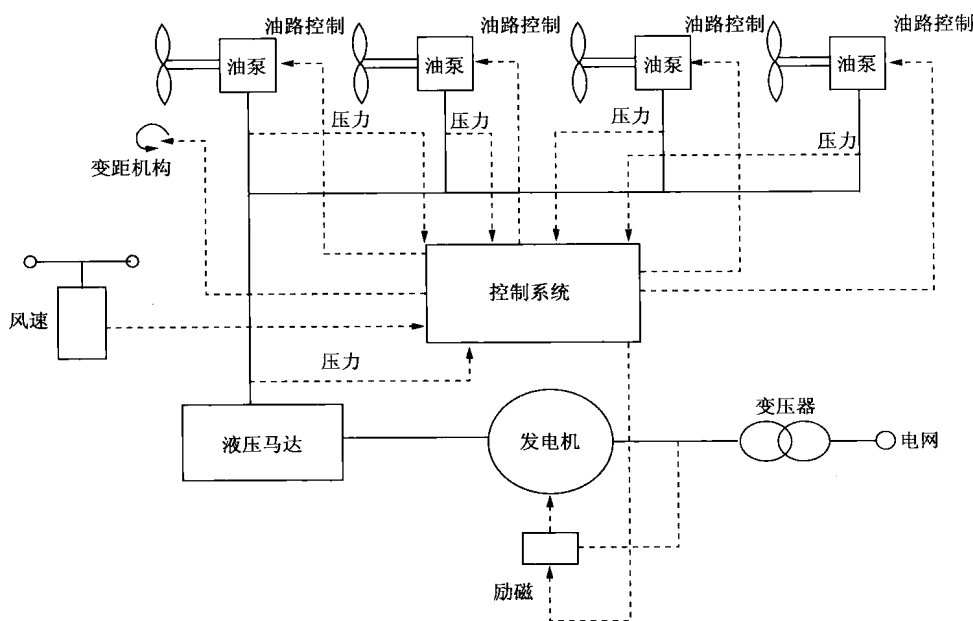


图 1.1 超低速风力发电机构成

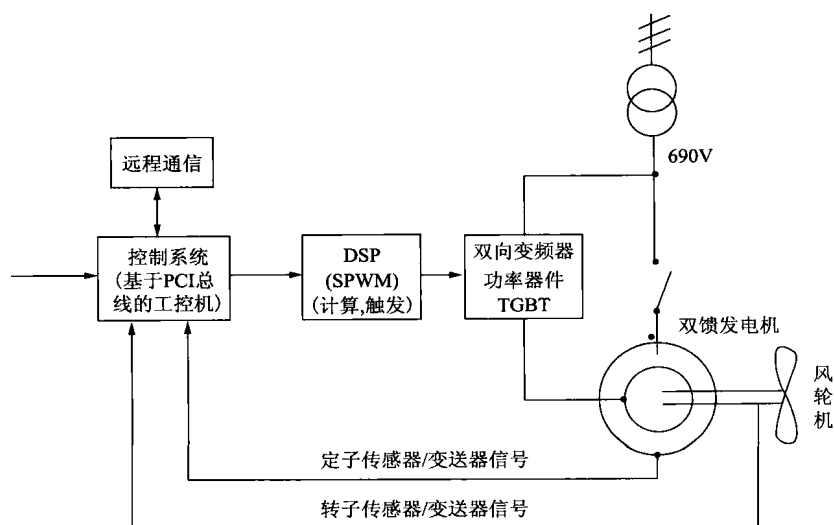


图 1.2 超低速风力发电系统原理框图

风轮是集风装置,它的作用是把流动空气具有的动能转变为风轮旋转的机械能。一般风力发电机的风轮由 2 个或 3 个叶片构成。

在风力发电机中,已采用的发电机有 3 种,即直流发电机、同步交流发电机和异步交流发电机。

调向器的功能是使风力发电机的风轮随时都迎着风向,从而能最大限度地获取风能。风力发电机几乎全部是利用尾翼来控制风轮的迎风方向的。尾翼的材料通常为镀锌薄钢板。

限速安全机构是用来保证风力发电机安全运行的。限速安全机构的设置可以使风力发电机风轮的转速在一定的风速范围内基本保持不变。

塔架是风力发电机的支撑机构,稍大的风力发电机塔架一般采用由角钢或圆钢组成的桁架结构。

风力发电机的输出功率与风速的大小有关,由于自然界的风速是极不稳定的,风力发电机的输出功率也极不稳定。风力发电机发出的电能一般是不能直接用在电器上的,先要储存起来。目前,风力发电机用的蓄电池多为铅酸蓄电池。

风力发电机利用风力带动风车叶片旋转,再透过增速机将旋转的速度提升,来促使发电机发电。依据目前的风车技术,风速大约是 1m/s 时(微风的程度),风力发电机便可以开始发电。

小型风力发电系统效率很高,但它不是只由一个发电机头组成的,而是一个有一定科技含量的小系统,即风力发电机、充电器和数字逆变器。小型风力发电系统的风力发电机由机头、转体、尾翼、叶片组成。每一部分都很重要,叶片用来接受风力并通过机头转为电能;尾翼使叶片始终对着来风的方向从而获得最大的风能;转体能使机头灵活地转动以实现尾翼调整方向的功能;机头的转子是永磁体,定子绕组切割磁力线产生电能。

风力发电机因风量不稳定,故其输出的是 $13\sim 25\text{V}$ 的交流电,必须经充电器整流,再对蓄电池充电,使风力发电机产生的电能变成化学能。然后用有保护电路的逆变电源,把电瓶里的化学能转变成 220V 交流市电,才能保证稳定使用。

通常人们认为,风力发电的功率完全由风力发电机的功率决定,总想选购大一点的风力发电机,其实这是不正确的。目前的风力发电机只是给电瓶充电,而由电瓶把电能储存起来,人们最终使用的电功率大小与电瓶大小有更密切的关系。在内陆地区,小的风力发电机比大的更合适。因为它更容易被小风量带动而发电,持续不断的小风,会比一时狂风更能供给较大的能量。当无风时人们还可以正常使用风力带来的电能,也就是说即使是一台 200W 的风力发电机,也可以通过配合使用大电瓶与逆变器,获得 500W 甚至 1000W 乃至更大的功率输出。

现在的风力发电机与几年前相比在性能上有很大改进,以前只是在少数边远地区使用,风力发电机直接接一个 15W 的灯泡,忽明忽暗经常损坏灯泡。现在由于技术进步,采用先进的充电器、逆变器,风力发电成为有一定科技含量的小系统,并能在一定条件下代替正常的市电。山区可以借此系统做一个常年不花钱的路灯;高速公路可用

它做夜晚的路标灯;山区的孩子可以在日光灯下晚自习;城市小高层楼顶也可用风力电机,这不但节约而且是真正的绿色电源。

1.2.2 风力发电的核心技术

风力发电系统中的两个主要部件是风力机和发电机。风力机面向着变桨距调节技术,发电机面向着变速恒频发电技术,这是风力发电技术发展的趋势,也是当今风力发电的核心技术。

1. 风力机的变桨距调节

风力机通过叶轮捕获风能,将风能转换为作用在轮毂上的机械转矩。

变桨距调节方式是通过改变叶片迎风面与纵向旋转轴的夹角,影响叶片的受力和阻力,限制大风时风机输出功率的增加,保持输出功率的恒定。采用变桨距调节方式,风力机输出功率曲线平滑。在额定风速以下时,控制器将叶片攻角置于零度附近,不做变化,近似等同于定桨距调节;在额定风速以上时,变桨距控制结构发生作用,调节叶片攻角,将输出功率控制在额定值附近。变桨距风力机的启动速度比定桨距风力机低,停机时传递冲击应力相对缓和。

由于变桨距调节风力机受到的冲击比其他风力机要小得多,可减少材料使用率,降低整体重量。且变桨距调节型风力机在低风速时,可使桨叶保持良好的攻角,比失速调节型风力机有更好的能量输出,因此,比较适合于在平均风速较低的地区安装。

变桨距调节的另外一个优点是,当风速达到一定值时,失速型风力机必须停机,而变桨距型风力机可以逐步变化到一个桨叶无负载的全翼展开模式位置,避免停机,增加风力发电机发电量。

变桨距调节的缺点是对阵风反应要求灵敏。失速调节型风力发电机由于风的振动引起的功率脉动比较小,而变桨距调节型风力发电机则比较大,尤其对于采用变距方式的恒速风力发电机,这种情况更明显,这就要求风力发电机的变桨距系统对阵风的响应速度要足够快,才可以减轻此现象。

2. 变速恒频风力发电机

变速恒频风力发电机常采用交流励磁双馈型发电机。它的结构与绕线型感应发电机类似,只是转子绕组上加有滑环和电刷,这样一来,转子的转速与励磁的频率有关,从而,使得双馈型发电机的内部电磁关系既不同于异步发电机,又不同于同步发电机,但它却具有异步发电机和同步发电机的某些特性。

交流励磁双馈变速恒频风力发电机不仅可以通过控制交流励磁的幅值、相位、频率来实现变速恒频,还可以实现有功、无功功率控制,对电网而言还能起到无功补偿的作用。

交流励磁双馈变速恒频发电机系统有如下优点:

① 允许原动机在一定范围内变速运行,简化了调整装置,减少了调速时的机械应力。同时使机组控制更加灵活、方便,提高了机组运行效率。

② 需要变频控制的功率仅是电机额定容量的一部分,使变频装置体积减小,成本降低,投资减少。

③ 调节励磁电流幅值,可调节发出的无功功率;调节励磁电流相位,可调节发出的有功功率;应用矢量控制可实现有功、无功功率的独立调节。

第 2 章 风力发电发展 现状与展望



2.1 风力发电发展回顾



2.1.1 2004 年

尽管全球风能发电增长幅度很大,但各地区发展很不均衡。2004 年,欧洲仍以 34 605MW 的产量占据内陆地区的主导地位,占全球风电产量的 72.7%;北美洲位居第二,为 7814MW;亚洲为 4726MW,占全球的 9.9%;澳大利亚-太平洋地区为 547MW。

由于鼓励措施得力,欧盟国家的风能发电发展迅速,到 2004 年底风能发电量已占到欧盟发电总量的 5%。根据欧盟统计局统计数字,2004 年欧盟的风能发电能力比 2000 年增长了 154%,风能发电新增能力占整个欧盟同期新增发电能力的一半以上。

从国家来看,德国、西班牙、美国、丹麦和印度 5 个主导市场,垄断着 37 749MW (2004 年)的市场份额,其中,德国总共生产了 16 629MW 的风能,占全球风能总产量的 35%;西班牙排在第二位,总共生产了 8263MW 的风能,占全球风能总产量的 17%;美国 2004 年总共生产了 6740MW 的风能,占全球风能总产量的 14%;丹麦排在第四位;而我国 2004 年的风能产量为 760MW,仅相当于全球风能总产量的 1.6%。



2.1.2 2005 年

据欧洲风能协会的统计数据,2005 年全球新增风能发电装机容量 1.18GW,比 2004 年增长 35%。2005 年,世界风电装机容量达到 5.9322GW,比 1995 年增加 5.4532GW。

2005 年,位于世界风电装机容量前 6 位的国家依次为德国(18 428MW)、西班牙