



“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

海上风电 送出工程技术与应用

HAISHANG FENGDIAN
SONGCHU GONGCHENG
JISHU YU YINGYONG

主 编 黄志秋 陈 冰 周 敏
副主编 陈 楠 许 峰 廖 毅



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

海上风电 送出工程技术与应用

主 编 黄志秋 陈 冰 周 敏
副主编 陈 楠 许 峰 廖 毅



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是《风力发电工程技术丛书》之一,全面、完整地介绍了海上风电送出及并网的工程技术,包括基础理论、技术原理、政策规划、设计技术和工程应用等方面,以新技术、新工艺、新方法为主要介绍内容,并以典型的工程实例对技术应用进行剖析,做到理论中有实际,实践中又有依据。全书共分7章,分别介绍了海上风电发展现状与相关政策、海上风电送出系统及工程技术、海上风电场并网的影响及对策、海上风电送出方式、海上风电送出系统设计、工程应用实例、海上风电送出工程新技术和展望等内容。

本书知识点丰富,包含了最新的权威统计资料,能切实反映当前国内外风力发电送出工程的先进技术,可供从事海上风电开发及技术研究的工程技术人员阅读参考,也可供高校能源相关专业的师生学习。

图书在版编目(CIP)数据

海上风电送出工程技术与应用 / 黄志秋, 陈冰, 周敏主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2016.5
(风力发电工程技术丛书)
ISBN 978-7-5170-4352-2

I. ①海… II. ①黄… ②陈… ③周… III. ①海上工程—风力发电—输电技术 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第110336号

书 名	风力发电工程技术丛书 海上风电送出工程技术与应用
作 者	主编 黄志秋 陈冰 周敏 副主编 陈楠 许峰 廖毅
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 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	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	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9印张 214千字
版 次	2016年5月第1版 2016年5月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	42.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

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

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
华北电力大学
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
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
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
同济大学
华南理工大学

丛书总策划 李 莉

编委会办公室

主	任	胡昌支	陈东明				
副	任	王春学	李 莉				
成	员	殷海军	丁 琪	高丽霄	王 梅	邹 昱	
		张秀娟	汤何美子	王 惠			

本书编委会

主 编 黄志秋 陈 冰 周 敏

副主编 陈 楠 许 峰 廖 毅

参编人员 杨 苹 李 峰 徐 伟 蔡田田 郝为翰

刘军伟 周 冰 张松光 王素文



前言

风能是世界上使用最为广泛和发展最快的可再生能源之一，海上风电由于其巨大的商业潜力和环保效益，近年来引发世界各国的重点开发。我国海岸线绵长，海域范围大，拥有十分丰富的海上风能资源，开发海上风能资源将有效改善沿海经济发达地区的能源供应情况，促进电源结构优化，缓解减排压力，带动低碳经济的发展。因此，大力发展海上风电是国家新能源主要战略方向。随着海上风电的发展，风电场的建设必然从潮间带、近海向更深海域推进。为确保海上风电场的电力安全可靠、灵活高效、经济合理地送出，其接入系统和并网等工程技术问题亟待研究、解决，包括海上大型风电接入与并网系统、海上升压平台、海底电缆输电系统的研发、成套设计与施工技术工程课题。当前，针对这方面的专门著作还很少，迫切需要一本系统地介绍海上风电送出工程技术与应用的专著，因此编者查阅、收集了大量国内外资料，总结了多年从事科研、工程设计和工程建设管理的经验，结合广东省第一个海岛风电多端柔性直流送出工程的实践情况，遵循科学性、先进性和实用性的原则，编著《海上风电送出工程技术与应用》一书，填补该领域的空缺。

本书全面、完整地介绍了海上风电送出及并网的工程技术，包括技术原理、政策法规、规划设计和工程应用等方面，以新技术、新工艺、新方法为主要介绍内容，并以典型的工程实例对技术应用进行剖析，做到理论中有实际，实践中又有依据。本书主要内容包括海上风力发电系统和送出系统的构成原理、主要设备、工程技术、并网方式、输电方案以及送出系统的全套设计思路；重点针对大型海上风电接入系统与并网工程技术与应用分章节进行

了论述。同时，在书中还就海上风电的并网关键问题和技术要求，提出了科学的解决方案和措施；对交流、直流的主流输送方式进行了对比论述，提出了适应性的系统设计方案，并以具体工程项目佐证分析，能切实反映当前国内外风力发电送出工程的先进技术，可供关注海上风电开发及技术发展的各相关方参考。

本书由中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司黄志秋教授级高工和陈冰、周敏高级工程师组织编著，由中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司陈楠、许峰、廖毅、徐伟、蔡田田、郝为翰、刘军伟、周冰高级工程师，华南理工大学杨革教授，广东电网有限公司李峰、张松光、王素文高级工程师共同编写完成。本书在编著过程中得到了中国能源建设集团有限公司相关专家及同事的大力支持和帮助，在此谨向他们表示谢忱。

由于当前海上风电送出技术的发展日新月异，限于编者的水平和经验，书中难免存在错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2015年10月



目 录

前言

第 1 章 海上风电发展现状与相关政策	1
1.1 引言	1
1.2 海上风电的发展现状	1
1.2.1 欧洲海上风电蓬勃发展	1
1.2.2 美国海上风电蓄势待发	2
1.2.3 我国海上风电增长强劲	2
1.3 相关政策	3
1.3.1 国外政策	3
1.3.2 国内政策	3
第 2 章 海上风电送出系统及工程技术	5
2.1 海上风力发电系统简介	5
2.1.1 系统构成	5
2.1.2 主要设备及功能特性	5
2.2 海上风电送出系统构成	6
2.3 海上风电送出系统主要设备	8
2.3.1 变电站的主要电气设备	8
2.3.2 换流站的主要电气设备	9
2.3.3 海底输电电缆及其主要附件	11
2.4 海上风电送出工程技术简介	11
2.4.1 系统并网工程技术	11
2.4.2 海上变电站工程技术	12
2.4.3 海上换流站工程技术	13
2.4.4 海底电缆工程技术	13
本章小结	14

第3章 海上风电场并网的影响及对策	15
3.1 海上风电场并网的影响	15
3.1.1 风电出力的特点	15
3.1.2 对电网的影响	16
3.2 海上风电场并网的对策	19
3.2.1 系统电压	19
3.2.2 谐波治理	20
3.2.3 系统稳定	20
3.2.4 系统调频	21
3.2.5 系统调峰	22
3.2.6 低电压穿越	22
本章小结	23
第4章 海上风电送出方式	24
4.1 HVAC 输送方式	24
4.1.1 HVAC 输送方式概述	24
4.1.2 HVAC 输送方式的特点	24
4.2 HVDC 输送方式	25
4.2.1 LCC-HVDC 输电	25
4.2.2 VSC-HVDC 输电	26
本章小结	28
第5章 海上风电送出系统设计	30
5.1 系统方案设计	30
5.1.1 技术参数要求	30
5.1.2 电压选择	31
5.1.3 海上风电送出方式选择	31
5.1.4 海上风电送出系统参数设计	31
5.1.5 对开关设备的要求	32
5.2 变电站及换流站设计	33
5.2.1 海上变电站设计	33
5.2.2 海上换流站设计	50
5.3 海底电缆线路设计	76
5.3.1 海底电缆线路路由选择	76
5.3.2 海底电缆选型	77
5.3.3 海底电缆接地方式选择	84
5.3.4 海底电缆敷设与保护	85
本章小结	91

第 6 章 工程应用实例 92

6.1 工程项目实例 92

6.1.1 工程列表 92

6.1.2 工程介绍 93

6.2 南澳示范工程 94

6.2.1 项目背景 94

6.2.2 系统设计 94

6.2.3 柔性直流换流站 102

6.2.4 多端柔性直流系统运行与控制 109

6.2.5 柔性直流换流站保护配置 116

6.2.6 柔性直流海底电缆线路 120

本章小结 124

第 7 章 海上风电送出工程新技术和展望 126

7.1 海上风电送出工程新技术 126

7.1.1 风电场群组网技术 126

7.1.2 VSC-HVDC 输电技术 126

7.1.3 海上变电站及换流站设计技术 127

7.1.4 海底电缆技术 128

7.2 展望 129

参考文献 130

第 1 章 海上风电发展现状与相关政策

本章简要介绍了国内外海上风电的发展现状和趋势，归纳汇总了涉及风电产业发展、发电管理、电价及附加、发展规划等相关政策要求，为后续章节作必要的铺垫。

1.1 引言

风能是世界上使用最为广泛和发展最快的可再生能源之一，与核能相比，风能资源丰富、不需要任何燃料；与太阳能相比，风能发电有具有技术成熟、成本较低的优势。全球的很多发达国家，包括欧洲和美国，都对风电的开发和利用十分重视，风电形式也不仅仅局限于陆地风电场，还有潮间带和近海风电场，而且有向更深海域发展的趋势。与陆地风电相比，海上风电风能资源的能量效益比陆地风电场高 20%~40%，还具有不占地、风速高、沙尘少、电量高、运行稳定以及粉尘零排放等优势，同时能够减少机组的磨损，延长风电机组的使用寿命，适合大规模开发。海上风电由于其巨大的商业潜力和环保效益，近年来越来越引起重视，正逐步成为新能源领域开发的亮点，发展潜力巨大，前景广阔。

而今，欧美各国都制定了相关的优惠政策，将在未来重点开发海上风能，从其发展规划可窥一斑。我国风能储量大、分布面积广，开发利用潜力巨大；2010 年，我国风电新增装机容量就已超越美国，成为世界第一大风电市场，预计未来很长一段时间都将保持高速发展。由于我国海上风能资源最丰富的东南沿海地区毗邻用电需求大的经济发达地区，可以实现就近消化，降低输送成本，所以发展潜力更大。早有业内专家表示，“中国新能源产业发展看风能，风能发展前景在海上，海上风能将成为中国风能未来发展方向和制高点。”因此风电被明确为国家“十二五”科学技术研发的六大方向之一。而且国家新能源战略要求大力发展海上风电，提出重点研究与之相配套的大型风电接入系统与并网技术、海上升压平台、海底电缆输电系统的研发、成套设计与施工技术的新能源工程课题。

1.2 海上风电的发展现状

1.2.1 欧洲海上风电蓬勃发展

欧洲由于其特殊的地理位置和气候条件，海上风能资源十分丰富。各国都制定了相关的优惠政策，将在未来重点开发海上风能，海上风电即将成为欧洲的主要能源来源之一。海上风电在欧洲已经发展了 20 余年，近年来随着英国、丹麦、德国等国陆地风电资源基本开发完毕，且减排温室气体和提高可再生能源比例的要求进一步提高，海上风电的发展再次被提上议事日程。2014 年上半年，欧洲安装的风电机组达到了 506 台，装机容量超



过 1200MW，主要分布在 16 个商业化的海上风电场项目和 1 个示范性海上风电场项目中。截至 2014 年 7 月 1 日，欧洲已经累计安装了 2304 台海上风电机组，总的并网装机容量达到 7343MW，这些机组分别分布在欧洲 11 个国家的 73 个风电场中。欧盟还制定了到 2020 年可再生能源占总能源需求 20% 的目标，提出了到 2020 年海上风电总装机容量 40GW 的目标，相应的，其海上风电装机容量需以年均 13.6% 的速度增长，从目前的 2696MW/a 增加到 2020 年的 6900MW/a。

欧洲主要国家未来海上风资源开发计划一览表见表 1-1。

表 1-1 欧洲主要国家未来海上风资源开发计划一览表

国 家	年 份	开发计划
英国	2020	计划装机容量 20000MW
法国	2020	计划装机容量 6000MW
丹麦	2015	计划装机容量 4000~5000MW
德国	2030	计划装机容量 25000MW
荷兰	2020	计划装机容量 6000MW
瑞典	2015	计划年发电量 10TWh
比利时	2012	计划装机容量 2000MW
爱尔兰	2020	计划装机容量 2000MW

1.2.2 美国海上风电蓄势待发

美国海上风电起步较晚，然而从美国海上风电未来发展规划可看到其广阔的发展前景。美国能源部研究评估美国有超过 900GW 的可开发海上风电资源，主要集中在适合安装海上风电的美国东海岸浅水区。美国能源部提出，到 2030 年美国 20% 的电力需求将由风电满足。要实现此目标，需新增 300GW 风电装机容量，其中包括 54GW 的海上风电。美国海上风电产业将掀起新一轮投资热潮，其东海岸多个海上风电项目正在规划实施中，例如：弗吉尼亚 468MW Cape Wind 项目，该项目的总体融资约 26 亿美元，是目前美国最大的海上风电项目，项目运营时间为 33 年；马萨诸塞州罗德岛 30MW Block Island 项目已经签署了全项目容量购电协议，该项目总体投资约 2.5 亿美元。项目运营时间为 25 年。以上两个项目都已经通过启动项目前期工作等方式确保项目符合 ITC 的要求，预计于 2016 年下半年竣工。

1.2.3 我国海上风电增长强劲

我国陆上风能储量约 250GW，海上风能储量约 750GW，是陆上风能储量的 3 倍。面对海上风资源的巨大储量，发展海上风电是我国可再生能源战略发展的必然趋势。

在我国辽阔的海域中，东南沿海及其周边区域和辽东半岛的风能资源十分丰富，有效风能密度不小于 $200\text{W}/\text{m}^2$ ，部分岛屿的风能密度在 $300\text{W}/\text{m}^2$ 以上，且风速大于 $8\text{m}/\text{s}$ 的时间年均可达到 7000~8000h。

2010 年 6 月，我国第一个国家海上风电示范项目——上海东海大桥风电场建设完成



全部并网发电。东海大桥项目是欧洲以外首个海上风电并网项目，开启了我国海上风电项目建设的先河。2010年6月中旬，我国首批海上风电特许权招标工作正式启动，总装机容量为1000MW的首批4个项目全部集中在江苏盐城，其中滨海、射阳各300MW，大丰、东台各200MW。随着国家开发沿海风电资源步伐的加快，我国海上风电行业有了实质性的进展，根据国内各省（直辖市）上报的海上风电发展规划初步统计，上海、江苏、浙江、山东、福建、广东6省市的海上风电规划，其中广东为10.71GW、江苏为7GW、浙江为2.7GW。截至2013年年底，全国海上风电项目累计核准规模约2220MW，其中，已建成390MW（含试验机组），主要分布于江苏省和上海市，建成项目目前均已并网；核准在建项目总规模为1830MW，主要分布于江苏、上海、浙江、广东。与此同时，为了抓住机遇，国内各大能源公司“跑马圈地”，几乎对我国适合海上风电的海域皆提出了开发意向。可以预见，我国海上风电市场将迎来强劲增长。

1.3 相 关 政 策

1.3.1 国外政策

世界各国制定的促进风电发展的政策法规主要有强制性、经济激励性、研究开发性和市场开拓性等4类，具体如下：

（1）强制性政策主要指政府主持制定的有关法律、法规和政策，以及其他非政府部门提出、政府批准的技术政策、法规、条例和其他一些具有强制性的规定。如美国的能源政策，英国、意大利、波兰的配额体系（绿色证书）。

（2）经济激励性政策是由政府制定或批准执行的各类经济刺激措施。包括各种形式的补贴、价格优惠、税收减免、贴息或低息贷款等，如德国、法国、西班牙、丹麦的上网电价政策。

（3）研究开发性政策是风电技术在研究开发和试点示范活动中，政府所采取的行动策略。

（4）市场开拓性策略是在项目实施过程中，采用有利于风电技术进步的新的运行机制和方法。如公开招标、公平竞争、联合开发方式等。

1.3.2 国内政策

我国已制定的促进风电产业发展的政策法规主要有以下几种：

（1）可再生能源法及配套政策。2006年1月1日，《中华人民共和国可再生能源法》颁布实施，要求通过减免税收、鼓励发电并网、优惠上网价格、贴息贷款和财政补贴等激励性政策来激励发电企业和消费者积极参与可再生能源发电。风电全额上网要求电网企业为可再生能源电力上网提供方便，并全额收购符合标准的可再生能源电量。财税扶持要求设立可再生能源发展专项资金，为可再生能源开发利用项目提供财政补贴等优惠政策。

（2）风电特许权。2003年，通过特许权方式，在风电领域引入市场运作机制，刺激投资者的积极性，促进风电设备制造的本地化，降低风电设备的造价，促进风电规模化



发展。

(3) 国产化要求。2005 年 7 月, 出台了《国家发展改革委关于风电建设管理有关要求的通知》(发改能源〔2005〕1204 号), 明确规定风电设备国产化率要达到 70% 以上, 进口设备要按章纳税。

(4) 其他有关政策。包括《可再生能源产业发展指导目录》(发改能源〔2005〕2517 号)、《可再生能源发电有关管理规定》(发改能源〔2006〕13 号)、《促进风电产业发展实施意见》(发改能源〔2006〕2535 号)、《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》(发改价格〔2006〕7 号)、《国家发展改革委关于印发可再生能源中长期发展规划的通知》(发改能源〔2007〕2174 号)、《国家发展改革委关于印发可再生能源发展“十一五”规划的通知》(发改能源〔2008〕610 号)、《国家发展改革委办公厅关于落实风电发展政策有关要求的通知》(发改办能源〔2009〕224 号)、《关于海上风电上网电价政策的通知》(发改价格〔2014〕1216 号)。

上述政策法规主要涉及风电产业发展、发电管理、电价及附加、发展规划等方面原则性的行业管理要求。

第 2 章 海上风电送出系统及工程技术

本章概括性地介绍海上风电场的发电系统构成和主要设备，重点介绍了其送电系统构成、主要设备 and 功能特性，以及海上风电送出工程的系统并网技术、海上变电站、换流站技术和海底电缆线路技术。

2.1 海上风力发电系统简介

2.1.1 系统构成

目前，海上风力发电系统的典型接线图如图 2-1 所示。

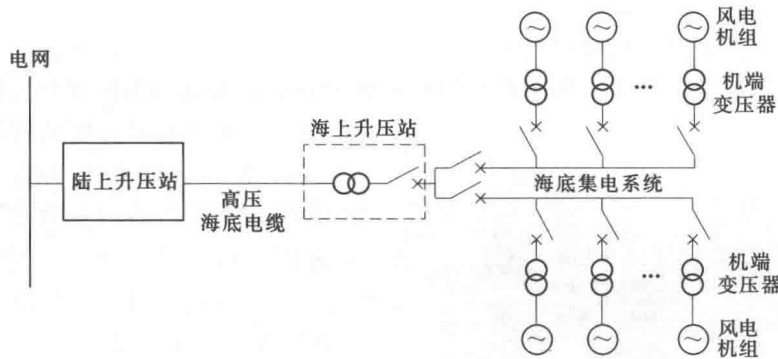


图 2-1 海上风力发电系统典型接线图

从图 2-1 可以看出，风力发电机由风能驱动，发出电能，是海上风力发电系统最为重要的系统构件。电能通过在机舱或基座内的变压器将电压抬升（如 690V/35kV）之后汇入海底集电系统。海底集电系统是连接各风电机组形成的电气系统，主要由连接各风电机组的海底电缆及开关设备构成，其作用是汇集各风电机组发出的电能，输送至陆上或海上升压站。

2.1.2 主要设备及功能特性

据前文所述，海上风力发电系统包括海上风电机组及海底集电系统两个部分。

风电机组由风轮、传动系统、偏航系统、液压系统、制动系统、发电机、控制与安全系统、机舱、塔架和基础、升压设备等组成，典型结构如图 2-2 所示。

海底集电系统由连接各风电机组的海底集电电缆、开关设备等组成。

(1) 风轮。由叶片和轮毂、滑环组成，是风电机组获取风能的关键部件，叶片是由复



合材料制成的薄壳结构,分为根部、外壳、龙骨三个部分;轮毂固定在主轴上,内装有变桨系统,与机舱经滑环连接;滑环为旋转部件(叶片和轮毂)与固定部件(机舱)提供电气连接。

(2) 传动系统。由主轴、齿轮箱和联轴节组成(直驱式除外),主轴连接轮毂与齿轮箱,承受很大力矩和载荷;齿轮箱连接主轴与发电机,叶轮转速一般为 $15\sim 25\text{r/min}$,发电机(非直驱式)额定转速一般为 $1500\sim 1800\text{r/min}$,齿轮箱增速比通常为 $1:100$ 左右。

(3) 偏航系统。由风向标传感器、偏航电动机、偏航轴承和齿轮等组成。偏航轴承连接机舱底架与塔筒齿轮环内齿,并与偏航电机啮合实现机舱偏航对风;偏航电动机驱动机舱转动对风,偏航速度一般为 $1^\circ/\text{s}$,通常有 $3\sim 5$ 台,通过减速箱或变频器降速。

(4) 液压系统。由电动机、油泵、油箱、过滤器、管路和液压阀等组成液压系统集中建压,通过液压管道为传动链刹车、偏航刹车、变桨系统输送压力。

(5) 制动系统。分为空气动力制动和机械制动两部分,空气动力制动通过变桨系统改变叶片角度,使叶片不对风,将叶轮减速。

(6) 发电机。分为异步发电机、同步发电机、双馈异步发电机和低速永磁发电机。

(7) 控制与安全系统。保证风力发电机组安全可靠运行,获取最大能量,提供良好的电能质量。

(8) 机舱。由底盘和机舱罩组成。

(9) 塔架和基础。塔架有筒形和桁架两种结构形式,基础为钢筋混凝土结构。

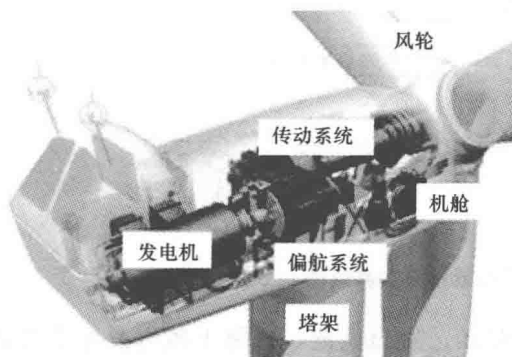


图 2-2 风电机组典型结构图

(10) 升压设备。因风机机端电压一般为 690V 或 850V ,机舱或基座内通过机端变压器将电压抬升(如 $690\text{V}/35\text{kV}$),将电能汇入集电系统,送至风电场升压站。

(11) 集电电缆。连接风电机组升压设备及风电场升压站集电侧,汇集风电机组发出电能送至风电场升压站,在集电电缆两端设置开关设备。

(12) 开关设备。安装于风电机组升压设备及风电场升压站 35kV 集电侧,在集电电缆两端对电能输送进行控制。

2.2 海上风电送出系统构成

海上风电是由海上风电机组叶片借助风力旋转发电后,由一系列交流或直流电气设备进行电能的转换、控制、变送后向大陆电网输送电能的一种新能源发电模式。由于其发电系统位于潮间带、近海或深海,故其并网方式大大有别于常见的火电、核电等陆上电源。

海上风电发展至今,其送出系统主要采用三种方式:当海上风电场的规模相对较小且风电场离海岸距离较近时,一般采用高压交流(HVAC)输电方式;随着海上风电场规