

风力发电机的发展及应用综述

徐 鹏

国华巴彦淖尔（乌拉特中旗）风电有限公司 内蒙古 巴彦淖尔 015300

摘 要：本文综述风力发电机的发展及应用。发展历程涵盖早期探索、技术积累、快速发展及成熟多元化阶段。技术分类包括按风轮轴方向、发电系统类型和装机位置分类。当前，全球风电市场规模增长，各国发展格局各异，竞争呈寡头垄断。应用领域有大规模风电场建设、分散式风电应用及特殊场景应用。风力发电机技术不断进步，应用持续拓展，在可再生能源领域发挥着日益重要的作用。

关键词：风力发电机；技术演进；应用场景

1 风力发电机的发展历程

1.1 早期探索阶段（起源-19世纪末）

风力利用的历史可追溯至古代的风车，用于灌溉、磨面等机械作业，但现代风力发电机的雏形始于19世纪。1887年，苏格兰工程师詹姆斯·布萊斯（James Blyth）在苏格兰安斯特拉瑟建造了第一台用于发电的风力发电机，这台装置以帆布为风轮，输出功率约1.2千瓦，为农舍提供照明，成为风力发电的标志性起点。同一时期，美国发明家查尔斯·布拉什（Charles Brush）于1888年在俄亥俄州克利夫兰建造更为先进的风力发电机，其风轮直径达17米，由144片雪松木板构成，配备了直流发电机，功率约12千瓦，可为其住宅和实验室供电，还能给蓄电池充电。这一阶段的探索以直流发电为主，技术简陋且功率较低，受风速波动影响大，主要用于小规模私人供电，未形成产业化趋势，但为后续技术发展奠定了基础，验证了风力转化为电能的可行性。

1.2 技术积累与初步发展阶段（20世纪初-20世纪70年代）

20世纪初至70年代，风力发电机进入技术积累期，受两次世界大战及化石能源开发的影响，发展节奏相对缓慢，但核心技术逐步突破。20世纪20-30年代，丹麦工程师保罗·拉库尔（Poul La Cour）对风力发电机进行了系统性改进，采用空气动力学优化的风轮设计，引入尾舵调节装置，提高了风能捕获效率，其研发的风力发电机功率可达20千瓦，用于乡村供电和电解制氢^[1]。20世纪50年代，美国为解决偏远地区供电问题，开展了大型风力发电机研发，通用电气公司推出了1.25兆瓦的风力发电机，采用水平轴设计，首次引入变桨距调节技术，虽因成本过高未大规模推广，但积累大型化设计经验。这一阶段，交流发电机逐渐替代直流发电机，变桨、偏航等

基础控制技术初步形成，部分国家建立小型风力发电示范项目。20世纪70年代初的石油危机，让各国意识到能源安全的重要性，开始重新重视风能等可再生能源，为后续快速发展埋下伏笔。

1.3 快速发展与技术突破阶段（20世纪70年代-20世纪末）

20世纪70年代石油危机后，风力发电机进入快速发展期，技术突破集中且产业化进程加速。1979年，美国在加利福尼亚州建成阿尔塔蒙特山口风电场，首批安装的风力发电机功率多为50-100千瓦，开启了风电场规模化建设的先河。这一阶段，水平轴风力发电机成为主流，变桨距和失速调节技术成熟，风轮直径从十几米扩大至数十米，单机容量从千瓦级提升至兆瓦级，1991年丹麦维斯塔斯公司推出1.5兆瓦风力发电机，标志着技术向大型化迈进。控制系统方面，微机控制替代机械控制，实现对风速、转速、功率等参数的精准调控，提高机组运行稳定性。欧洲尤其是丹麦、德国成为技术研发核心区域，丹麦建立完善的风电产业体系，从零部件制造到整机集成形成产业链；德国推出“能源转型”相关政策，推动风电市场化发展。至20世纪末，全球风电累计装机容量突破10吉瓦，风力发电机从示范项目走向商业化应用，成本较70年代下降约60%，为成熟发展奠定了坚实基础。

1.4 成熟与多元化发展阶段（21世纪初至今）

21世纪以来，风力发电机进入成熟与多元化发展阶段，技术迭代加速，应用场景不断拓展。单机容量实现跨越式增长，从21世纪初的1-2兆瓦提升至2020年后的15兆瓦以上，海上风力发电机更是突破20兆瓦，风轮直径超过200米，风能利用系数提升至45%以上。技术创新聚焦于大型化、智能化和轻量化，变流器技术从两电平发展为三电平，提高了电能质量；液压变桨、主动偏航技术进一步提升机组对复杂风况的适应性；大数据和AI技

术的应用实现预测性维护,降低运维成本。发展模式呈现多元化,海上风电因风速稳定、装机容量大成为新增长点,浮式海上风电技术突破传统固定式基础的限制,可在深远海部署;分散式风电针对偏远地区、工业园区等场景,实现就近供电。同时,风电与储能、光伏的融合发展加速,形成“风光储”一体化系统,提升可再生能源的消纳能力。截至2024年,全球风电累计装机容量超1200吉瓦,成为仅次于火电、水电的第三大电力来源。

2 风力发电机的技术分类

2.1 按风轮轴方向分类

风力发电机按风轮轴方向分水平轴(HAWT)与垂直轴(VAWT)两大类,二者结构、性能及应用场景差异大。水平轴风力发电机风轮轴与地面平行,需正对风向运行,核心结构含风轮、机舱(有发电机等)和塔架,机舱顶部传感器与偏航系统可实时调整方向捕获最大风能^[2]。其优势是风能利用效率高、技术成熟、单机容量大,从千瓦级到数十兆瓦,是风电场主流机型,陆上和海上大规模应用均以它为主。垂直轴风力发电机风轮轴与地面垂直,可接受任意方向来风,无需偏航系统,结构简单,机舱可地面安装,运维便捷。但受空气动力学限制,风能利用系数低,单机容量多在百千瓦级以下,适用于小型分散式场景。

2.2 按发电系统类型分类

风力发电机按发电系统类型分恒速恒频和变速恒频两类,核心差异在转速调节与电能质量控制。恒速恒频系统多采用异步发电机,风轮转速固定,经齿轮箱提至发电机额定转速,输出与电网频率一致的电能。其结构简单、成本低,早期应用广,但风能利用效率低,输出功率波动大,影响电网稳定性,逐渐被变速恒频系统替代。变速恒频系统通过变流器使转速与电网频率解耦,风轮可调整转速跟踪最佳叶尖速比,风能利用效率高10%-15%。它分永磁直驱式和双馈式两种主流路线:永磁直驱式无齿轮箱,运维成本低,但发电机体积大;双馈式保留齿轮箱,技术成熟度高,曾是陆上风电主流。

2.3 按装机位置分类

风力发电机按装机位置分陆上和海上两类,因安装环境不同,在结构设计、技术要求和应用特点上有明显区别。陆上风力发电机安装于陆地表层,受地形、交通影响,塔架高度80-150米,风轮直径适配塔高及风速,单机容量1兆瓦到8兆瓦。其优势是建设周期短、运维便捷、初始投资低,可在多种地形部署,是风电发展初期主要形式。但存在风速稳定性差、土地占用大等问题,部分优质风资源区远离负荷中心,需配套输电线路。

海上风力发电机安装于沿海海域,分固定式和浮式,固定式适用于浅海,浮式适用于深远海。海上风速高且稳定,发电效率高,不占土地、噪声影响小。但海上环境复杂,对机组性能要求高,建设和运维需专用设备,初始投资是陆上的1.5-2倍。近年来,海上风电技术成熟、成本下降,成全球风电增长核心动力。

3 风力发电机的发展现状

3.1 全球风电市场规模与增长趋势

全球风电市场近年稳健增长,成可再生能源核心增长极。2023年,全球风电新增装机容量179吉瓦创新高,累计超1200吉瓦,较2010年增近10倍,占全球电力总装机超10%。增长动力主要有两方面:一是“碳中和”目标促使各国出台扶持政策,如欧盟、中国提出明确风电装机目标;二是技术进步使成本下降,陆上、海上风电度电成本较2010年大幅降低,性价比凸显。分区域看,亚洲是最大市场,2023年新增装机占比超60%;欧洲海上风电领先;北美市场加速扩张。未来,海上、深远海风电及风电与储能融合是热点,预计2030年全球风电累计装机将突破2000吉瓦^[3]。

3.2 主要国家和地区的风电发展情况

全球主要国家和地区风电发展格局各异。中国是全球风电装机第一大国,2023年累计超600吉瓦,占全球一半以上,陆上、海上风电分布广泛且技术有突破。美国是第二大市场,陆上风电核心在得克萨斯州等,海上风电发展迅速。欧洲是风电技术发源地,丹麦风电渗透率高,德国、英国海上风电各有优势。印度是新兴市场,依托陆上风资源建设大型风电场。另外,巴西、澳大利亚、中东等加大投资,成为重要增长极。各国依托资源与政策,推动风电产业不断发展。

3.3 风电产业竞争格局与主要企业

全球风电产业呈寡头垄断格局,头部企业主导技术研发与供应,上下游协同发展。整机制造领域,2023年全球前五大企业市场份额超70%,丹麦维斯塔斯居首,产品系列全、业务广;中国金风科技等三家企业跻身前五,凭成本与本土化优势扩张海外。德国西门子歌美飒海上风电优势大。零部件领域,中国企业在叶片等环节竞争力强,中材科技等叶片份额超30%;齿轮箱、变流器领域也有部分企业技术领先。运维服务领域,专业运维企业崛起,维斯塔斯运维覆盖超100吉瓦机组,中国金风科技也建立完善体系,竞争转向全生命周期服务。

4 风力发电机的应用领域

4.1 大规模风电场建设

大规模风电场是风力发电机最主要的应用形式,通

过集中开发、集中并网实现规模化发电,为电网提供稳定的电力供应。陆上大规模风电场多选址于风资源丰富的草原、戈壁、山地等区域,如中国“三北”地区的千万千瓦级风电场,采用单机容量3-8兆瓦的水平轴风力发电机,通过数百台甚至数千台机组集群部署,配套建设升压站和输电线路,将电能并入主干电网。这类风电场年利用小时数可达2000-3000小时,单场年发电量超10亿千瓦时,可满足数百万人口城市的部分用电需求。海上大规模风电场则聚焦于浅海及深远海区域,如英国伦敦阵列风电场、中国广东阳江海上风电场,采用8-15兆瓦以上的大型海上机组,通过固定式或浮式基础部署,因风速稳定,年利用小时数可达3000-4000小时,发电效率更高。大规模风电场的优势在于规模效应显著,可降低单位建设和运维成本,同时便于统一管理和调度,是各国实现“碳中和”目标的核心电力来源,目前全球超过90%的风电发电量来自大规模风电场。

4.2 分散式风电应用

分散式风电应用以“就近开发、就近消纳”为核心,针对负荷中心周边的风资源,部署小型或中型风力发电机,满足局部用电需求,减少输电损耗。其应用场景主要包括乡村供电、工业园区补电、海岛及偏远地区供电等。在乡村地区,分散式风电可与光伏、储能结合,形成“风光储”微电网,解决偏远乡村电网覆盖不足的问题,如中国内蒙古、新疆等地的乡村微电网项目,单台100-500千瓦的风力发电机可满足数十户至数百户村民的用电需求。在工业园区,分散式风电可直接为工厂提供生产用电,降低企业用电成本,如德国部分汽车工业园区部署的分散式风电场,年发电量可满足园区10%-20%的用电需求。在海岛及偏远地区,分散式风电可替代柴油发电机,实现能源自给自足,减少化石能源运输成本,如中国西沙群岛、挪威北部海岛的分散式风电项目,提升了能源供应的稳定性和环保性。分散式风电的优势在于灵活性高、投资周期短、对电网接入要求低,近年来随着技术进步,其市场占比正逐步提升,成为大规模风电场的重要补充。

4.3 特殊场景应用

风力发电机在特殊场景的应用虽规模较小,但展现出独特的价值,通过定制化设计适配特殊环境需求。高海拔风电是典型场景之一,在海拔3000米以上的青藏高原、安第斯山脉等区域,空气稀薄、低温、强紫外线环境对机组性能要求极高,定制化的高海拔风力发电机采用耐低温材料、优化的空气动力学设计和防紫外线涂层,如中国西藏那曲风电场的机组,可在-30℃低温环境下稳定运行,为高海拔地区提供清洁电力^[4]。极地风电针对南极、北极的极寒、强风环境,采用抗冰设计和耐寒控制系统,挪威、美国等国在北极地区部署的小型风电项目,为科考站提供电力,替代传统柴油发电。另外,还有小型垂直轴风力发电机应用于城市建筑一体化场景,如安装在写字楼屋顶、路灯顶部的微型风力发电机,结合光伏板为建筑照明、电梯等设备供电,实现建筑能源自给;在通信基站领域,小型风力发电机与储能结合,为偏远地区的通信基站提供持续供电,保障通信网络覆盖。这些特殊场景应用推动了风力发电机技术的多元化发展,拓展了风能利用的边界。

结束语

风力发电机历经多年发展,从早期探索走向成熟多元化,技术不断革新,应用场景日益丰富。全球风电市场规模持续扩大,各国积极推动风电产业发展。未来,随着技术的进一步突破和应用领域的不断拓展,风力发电机将在实现全球“碳中和”目标、构建清洁低碳能源体系中发挥更为关键的作用,为人类可持续发展提供强大动力。

参考文献

- [1]张恩琦,于思洋,王皓,等.风力发电机的发展及应用综述[J].电气工程学报,2025,20(1):14-25.
- [2]刘晓辉,高人杰,薛宇.浮式风力发电机组现状及发展趋势综述[J].分布式能源,2020,5(3):39-46.
- [3]田炜.风力发电机及风力发电控制技术研究[J].光源与照明,2021(11):89-91.
- [4]王卫卫.风力发电机及风力发电控制技术探究[J].轻松学电脑,2021,000(002):P.1-1.