

# 风电机组技术现状及发展方向

许国东<sup>1</sup>, 叶杭冶<sup>1</sup>, 解鸿斌<sup>2</sup>

(1. 浙江运达风电股份有限公司, 杭州 310012; 2. 新能源与储能运行控制国家重点实验室  
(中国电力科学研究院有限公司), 北京 100192)

**摘要:** 风力发电是可再生能源发电的重要形式, 也是我国目前重点发展的、具有全球竞争力的战略性新兴产业之一, 而风能装备技术的发展则是我国实现可再生能源高比例应用和产业持续健康发展的重要依托。本文详细分析了风电机组技术的发展历程和国内外发展现状, 分析了国内外技术的差距与瓶颈, 并对风电机组技术在提升结构效率、降低经济成本、增强环境友好性和资源节约利用等方面的发展趋势和市场需求进行了展望。

**关键词:** 风力发电; 风电机组; 技术开发

**中图分类号:** TK83 **文献标识码:** A

## The Current State and Future Development of Wind Turbine Technology

Xu Guodong<sup>1</sup>, Ye Hangye<sup>1</sup>, Xie Hongbin<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Windey Co., Ltd., Hangzhou 310012, China; 2. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China)

**Abstract:** Power produced through wind power technology is an important form of renewable energy, and also the focus of China's current efforts to strengthen the global competitiveness of its strategic emerging industries. Technology development in wind power equipment would insure the industry's bloom for a long time and a high application ratio of wind power. In this paper, a detailed analysis of the wind turbine technology at both domestic and international levels is conducted to learn about the history and current state of the wind turbine technology, and problems faced by domestic and international markets. Furthermore, some suggestions and prospects are also presented for the healthy development of the wind turbine technology, in fields of structure efficiency promotion, production cost reduction, environment protection, and resource conservation.

**Keywords:** wind power; wind turbine; technology development

### 一、前言

风能是资源潜力巨大、技术较为成熟的可再生能源, 在减排温室气体、应对气候变化的新形势下

下, 越来越受到世界各国的重视, 并已在全球大规模开发利用。“十一五”到“十二五”期间, 我国风电经历了飞速发展的十年, 风电成为继火电、水电之后的第三大电源。根据全球风能理事会统计,

收稿日期: 2018-05-15; 修回日期: 2018-05-21

通讯作者: 叶杭冶, 浙江运达风电股份有限公司, 研究员, 总工程师, 主要研究方向为风力发电; E-mail: yehy@chinawindey.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国能源技术革命的技术方向和体系战略研究”(2015-ZD-09)

本刊网址: www.enginsci.cn

2017 年,我国风电新增装机容量达 19.5 GW,累计装机容量达 188.2 GW,占全球风电总装机量的 35%。根据中国电力企业联合会的统计数据,2017 年,我国风电装机量占全国发电装机总量的 9.2%,风电的年发电量占全国发电总量的 4.8% [1]。

我国开展风电技术研发已有 40 多年的历史,与欧美国家同时起步,早期主要由科研机构和大专院校进行样机研究和试制,在“九五”和“十五”期间,我国首批风电整机制造企业初步掌握了定桨距机组总体设计技术,实现了规模化生产,迈出了产业化发展的第一步。“十一五”以来,随着国家陆续制定出台了促进风电等可再生能源发展的相关法规和扶持政策,众多国内外企业大举投入中国风电制造业,通过引进生产许可证、建立合资企业、开展自主研发或联合研发等手段,研制兆瓦级以上风电机组产品。经过一定时期的风电机组技术引进和产业化生产,国内风电整机制造企业对风电技术开发的路线图、关键要素和潜在风险的认识日益深入,开发出若干具有自主知识产权的机型,在单机容量上也逐渐接近国际领先水平 [2]。

我国风电企业通过引进消化吸收和再创新,掌握了关键核心技术,并且在适应低风速条件和恶劣环境的风电机组开发方面取得了突破性进展,处于全球领先地位,在大容量机组开发上也基本实现了与世界同步。这些成就,既保证了我国风电产业的持续快速发展,也为我国风电产业实现从大到强的跨越式发展奠定了基础。

为适应我国中东部和南部地区巨大的低风速资源,近年来很多整机设备厂商纷纷推出高塔筒和长叶片等方案,在技术开发的过程中借鉴了欧洲厂商的经验,但也有不少是我国的设备厂商因地制宜,根据国内资源和产业配套情况提出的一些新的思路和方法,体现出我国整机设备厂商在技术路线方面已经开始具备一定的自主创新能力。

我国在风电机组领域的基础研究和共性技术研究方面相对不足,风电机组设计软件及载荷评估所用的软件绝大部分为欧洲公司产品,设计标准和理念方面基本全部按照 DNV.GL 公司提出的风电机组认证规则及国际电工委员会 (IEC) 提出的 IEC 61400 系列风电机组技术标准的要求进行,未充分考虑到我国风能资源、自然环境和电网接纳方式的特殊性。

国外风电行业在跨行业的技术整合与成果转化方面非常活跃,一直以来引领主流技术的发展路线,在基本理论、基础工艺和材料应用等方面至今仍具有领先优势。从长期来看,风电是一个对设备可靠性要求非常高的资金与技术密集型产业,从全球范围来看,由于风电机组产业的技术和资金门槛的提高,行业集中度也在不断提高。

## 二、风电机组技术的发展现状

### (一) 大型风电机组整机设计与制造发展现状

#### 1. 大型风电机组的开发

在市场需求和竞争的推动下,中国大型风电机组开发技术升级和国际化进程不断加快。当前我国 1.5~4 MW 风电机组已形成充足的供应能力,部分机组制造商的 5~6 MW 风电机组样机也已下线。

目前,国外主要的整机制造商已经完成 4~7 MW 级风电机组的产业化,8~10 MW 级的风电机组样机已挂机,欧美整机设计公司均进入到 10 MW 级整机设计阶段。维斯塔斯风力技术公司 (Vestas) 和德国 Senvion 公司都发布了将开发 200 m 左右叶轮直径的 10 MW 风电机组的计划,2018 年美国通用电气公司宣布将在 3 年内完成 12 MW 海上风电机组的开发。

在全球范围内,欧洲海上风电发展起步最早,装机规模占比最高。2017 年,欧洲新增海上风电装机量即达到了 3 GW,迎来井喷式的增长。这说明欧洲厂商通过多年的实践,积累了丰富的设计和工程经验,对于海上风电投资回报和风险控制具有充分的信心。

目前,欧洲 6 MW 海上风电机组已形成产业化能力并实现批量装机,8 MW 海上风电机组进入样机试运行阶段,更大容量的海上风电机组也已经开始进行设计。在海上风电机组基础方面,欧洲具备了单桩、多桩、重力桩、导管架等多种样式基础形式的设计、制造能力。在海上风电业务领域,技术、资金和工程经验的壁垒比陆上风电更为显著,美国西门子公司、西班牙歌美飒集团在该领域已经形成了巨大的领先优势。

我国已有少量海上风电场投入运行,由于缺少海上风电场示范经验,尚未完全掌握风电机组的设计开发与整个海上风电工程设计的协调性,导致占

海上风电投资成本较大比例的基础、线路和变电站设计成本难以降低，加之机组的可靠性仍未得到充分验证，海上风电的投资回报存在较大的不确定性。因而，需要通过对风电机组控制策略、叶片、塔架、并网特性的深度定制和研究，实现风电机组与海上风电工程设计的整体优化，避免各部件单独设计导致过剩及浪费，有效降低海上风电度电成本。

### 2. 零部件配套

在风电机组零部件配套方面，我国风电产业已经形成包括叶片、塔筒、齿轮箱、发电机、变桨和偏航系统、轮毂、变流器等在内的零部件生产体系。上述主要零部件的产量均已居全球第一位，除配套国产整机厂商外，部分零部件也对国外厂商有少量配套。但是，在高性能轴承、油脂、传感器、控制器等方面，国产零部件尚不能实现对进口零部件的完全替代。

我国风电产业领域各类零部件在工程应用方面积累了大量经验，但在设计原理和优化方法、新材料和新工艺的运用、零部件开发过程中的多物理场仿真和全性能验证测试、高性能零部件的品质管控等方面仍然存在短板，在机组控制技术和整机、零部件具体运行性能关联性的研究方面尚存在很大不足。

总体来看，我国风电整机和零部件配套行业不同程度地存在着大而不强、泛而不精的现象，在基础材料和工艺技术方面的研究比较欠缺，在长期可靠性、产品一致性方面与部分进口产品尚存在差距。多数零部件厂商在考虑设计开发和工程应用时多着眼于自身，在系统性认识和产业链深度合作方面仍需要进一步加强。

### 3. 风电试验平台

国外风电实验室大多覆盖风能资源评估、风电机组现场测试、传动链平台测试、风电并网仿真等领域。如美国国家可再生能源实验室（NREL）建立了不同时间尺度的风能资源预测模型、7 MVA 多功能电网扰动模拟装置、5 MW 风电机组传动链测试平台等研究平台，具有国际先进水平的风电/光伏发电设备及零部件的试验研发能力；丹麦国家可再生能源实验室（DTU/RISØ）在风能领域的研究包括风能资源评估与微观选址、风电功率预测、风电并网与控制、海上风电、空气动力学研究和设计、结构设计和可靠性、遥感和试验、边界层气象与湍

流、材料等。

我国目前仅有部分风电企业建设有自己的动力试验平台，但是测试功能相对单一，不具备公共性和独立性，各厂商大多根据自身的经验、认识和产品开发的侧重点来开展研究性试验，开放交流显著不足。

2010年，我国在张北建立了国家风电技术检测与研究中心，借助公共试验场开展了一系列风电设备的现场运行性能和电网适应性测试，为我国提高产业技术能力和加快规模化发展提供了有效助力。

我国适合开发海上风电的区域集中在东南沿海，具有台风、盐雾、高温、高湿等恶劣气候特点。目前我国针对上述风电应用环境，系统性的专业检测技术能力尚未形成，亟需加强相关检测能力建设。而欧美针对海上风电场在建设和运行期间对水文、电网、气象、生物等影响已开展了多项检测研究活动，并且开发出一系列专用测试设备。

## （二）数字化风电技术发展现状

随着风力发电市场容量和装备产业的快速大规模发展，风电机组的可靠性、运行效率、工作寿命等问题开始受到专家学者们的高度关注。针对这一问题，数字化风电技术，在风电智能监控、智能运维、故障智能诊断和预警等方面已开展深入研究探索。

### 1. 风电智能监控

我国风电场监控系统主要存在协议不开放，不同的厂商在协议信息中描述不统一，无法实现互联互通和扩展等问题。这些系统使用的通信协议结构各异，信息描述不统一，难以实现互联互通和扩展，即便是同一制造商生产的风电机组，由于电力电子技术、控制技术、单机容量和软件版本的不同，它们拥有的控制方式也可能不同，且需要不同的运行参数和调控指令，这给风电场统一调度控制与生产管理制造了很大障碍。

为了实现风电场中互联性、互操作性和可扩展性，国际电工委员会（IEC）起草制定了 IEC 61400-25 标准。该标准定义用于搭建风电场监控系统平台的通信原理和信息交换模型等方面，是电力系统自动化通信协议 IEC 61850 标准在风力发电领域内的延展。我国也对 IEC 61400-25 标准进行了国家标准的转化与执行，基本实现了风电场的监控运行管理。



## 2. 风电智能运维

我国风电设备多运行于自然条件艰苦、可到达性较差的环境，对智能运维的需求尤为迫切，力求在考虑设备可靠性、维修性、经济性等影响因素的情况下，实现定检、维修、维护的合理安排，以达到减少值守人员数量、缩短备件供应时间和提高运行可靠性的目的。

在风电场智能化运维管理系统方面，国外起步较早，实用化水平也相对较高，作为风电场控制系统的载体，GH-SCADA、RISØ-CleverFarm等系统除具有完成传统的数据采集、分析、展示的功能外，还在功能上集成了风电场优化控制、运行数据分析、供应链服务、信息流管理等高级控制功能，已初步体现了风电场智能化运维的理念。

我国陆上风电场智能化运维水平在精细化与信息化方面与国际上存在较大差距。海上风电场在运维管理的限制性条件、服务装备、安全要求等方面和陆上风电场存在显著差异，欧洲厂商根据多年经验，形成了海上风电场运维管理的系统性方法，而我国目前海上风电场的运维手段和理念主要借鉴陆上风电场的经验，尚未形成真正适用于海上风电场的运维管理体系。

## 3. 风电机组故障智能诊断和预警

我国目前已经面临大批风电机组陆续过保的现状，风电机组可利用率下降、传动系统和叶片等零部件的性能下降和故障造成的停机现象较为严重。国内一些科研机构 and 整机厂家逐渐开始重视风电机组健康状态诊断技术，并借鉴国外先进经验开展了初步研究，也已开发出一些状态监测产品批量应用到风电场。

一些风能利用发达的国家，如丹麦、德国、西班牙等拥有长期共生、紧密合作的风电零部件与整机产业链，并根据大量现场采集的运行数据开展风电机组运行状态评价和全寿命周期评估，将风能资源、风电规划、风电场评估、风电机组设备运行状态与检测结果、风电场运行维护、风电场性能评估等统一考虑，用于开展风电机组状态评价、故障诊断以及经济性运行。

随着大数据技术的发展，各整机厂商纷纷建立大数据中心并开展了风电机组状态监控及故障预警的研究，但国内风电机组故障诊断技术从整体来看，产品分析和诊断功能都较为薄弱，主要问题在于对

于整机和零部件的运行机理与失效模式认识尚不够深入，当前以趋势判断和定性分析为主，缺乏定量分析，还不具备整套评估体系及对故障进行准确判断与预警的方法。

## (三) 电网友好型技术发展现状

随着风电比例的不断上升，出于电网稳定运行考虑，我国对风电机组的并网性能也不断提出新的要求，包括低电压穿越、高电压穿越、惯量响应和一次调频等。目前，低电压穿越已成为我国风电设备入网的强制性要求，对高电压穿越、惯量响应和一次调频能力的要求正在深入论证中，但还没有提出明确的技术指标及测试方法。各个国家都根据自身电力系统的情况，提出有针对性的风电设备入网标准，部分国家的入网标准中对风电的高、低电压穿越和一次调频性能要求已经非常明确。

国外设备厂商对于风电机组在故障穿越中的动态特性、安全极限、机群的互动稳定性、风电机组和风电场模型验证、风电机组和风电场电能质量评价等方面有着深入的研究并进行了相应的测试，国内厂商则多停留于功能实现，在技术的深入探索和优化方面尚待加强。

由于我国近年来风电规模增长迅猛，并且在风电大规模并网、传输和运行方面获得了相当多的实际经验和成果，IEC组织将新成立的TC8 SC8A“大容量可再生能源接入电网”工作组和TC8 SC8B“分布式能源电力系统”工作组的秘书处设立于中国，我国技术专家能够更多地参加到国际标准的制订工作中，开展更为广泛的技术交流，极大地提高了我国风电机组产业在电网接入技术领域的话语权。

## (四) 风电新概念技术发展现状

除了传统风力发电技术，风电新概念技术也随之快速发展。为满足未来大容量海上风电机组的需要，美国2009年即由可再生能源实验室(NREL)和美国超导公司、东元西屋电机公司等签署协议，联合开发大容量风电用超导发电机，欧洲众多厂商也纷纷介入这一领域。美国通用电气公司、美国超导公司、德国西门子股份公司、日本川崎重工业株式会社等都已进行了兆瓦级超导发电机的试制和测试，中国船舶重工集团公司第七一二研究所也已进

行了样机开发 [3]。

高温超导电机是一项应用新材料、新方法、新工艺的多学科高新技术，技术难度大，而且国内高温超导电机的研究起步较晚、研究经费少，研究的深度和广度还不够，基础研究、技术水平与技术手段与美国和德国相比还存在明显差距。

风能近地高度范围内，由于地面粗糙度而具有切变特性，即高度越高则平均风速越大，因而对高空风能资源的利用在多年前就得到了国内外学者的关注 [4]。我国高空风电目前仍处于探索阶段，有少量小功率机组投入试运行，但尚未有商业案例。

关于高空风力发电，国外的创业公司提出了很多有想象力的方案，谷歌收购了硅谷的高空风电创业公司 (Makani)，麻省理工学院则投资了创业公司 Altaeros Energies，上述两家公司均设计制造了样机进行现场测试 [5]。对比国内外厂商，在高空风电领域，国外厂商的技术研发起点很高，理论基础扎实，在实践中采用了大量新材料和传感器，在装备设计中均采用可移动、可放飞、可回收的路线，工程经济性较好，相对于国内厂商有显著优势。

### 三、技术发展趋势和需求

在风电发展方面，我国将继续落实陆上大型基地建设、陆上分散式并网开发和海上风电基地建设，并结合我国制造业转型升级的国家战略，积极推动整机设备和零部件出口。风电机组出于充分利用风能资源和降低度电成本的目的，不断向大型化、智能化、数字化的方向发展，而具体技术突破则更多地借助信息化、集群化以及多学科的交叉融合。

#### (一) 大型风电机组整机设计与制造发展趋势和需求

##### 1. 大型风电机组的开发

随着风电机组单机容量的不断增加及我国风电开发的不断深入，利用智能控制技术，通过先进传感技术和大数据分析技术的深度融合，综合分析风电机组运行状态及工况条件，对机组运行参数进行实时调整，实现风电设备的高效、高可靠性运行，是未来风电设备智能化研究的趋势。

大型风电机组整机技术需求主要包括：大功率风电机组整机一体化优化设计及轻量化设计技术，

大功率机组叶片、载荷与先进传感控制集成一体化降载优化技术，大功率风电机组电气控制系统智能诊断、故障自恢复免维护技术，以及大功率陆上风电机组及关键部件绿色制造技术。

我国海床的构成特征确定了我国海上风电机组基础段的工程成本将高于欧洲，而我国海域的夏季台风则对海上风电机组了严峻挑战，这就促使我国海上风电市场更需要设备具有大容量和高可靠性。

海上风电机组技术需求主要包括：适用于我国的近海、远海风电场设计、施工、运输、吊装关键技术；适合我国海况和海上风能资源特点的风电机组精确化建模和仿真计算技术；10 MW 级及以上海上风电机组整机设计技术，包括风电机组、塔架、基础一体化设计技术，以及考虑极限载荷、疲劳载荷、整机可靠性的设计优化技术；高可靠性传动链及关键部件的设计、制造、测试技术以及大功率风电机组冷却技术；自主知识产权的海上风电机组及其轴承和发电机等关键部件；对于恶劣海洋环境对机组内部机械部件、电控部件以及对外部结构腐蚀的影响；台风、盐雾、高温、高湿度海洋环境下的风电机组内环境智能自适应系统。

##### 2. 零部件配套

在风电机组大型化的同时，结构性问题的重要性也越来越凸显，一些新型的技术方案，如分段式叶片、全钢分瓣式柔性塔架、低成本的辅助控制小型激光雷达、海上机组用的高度生物可降解油品等我国尚未完全掌握。

叶片大型化和柔性化带来一些新的问题，如叶片的一阶扭转频率越来越低，叶片气弹发散以及颤振稳定性边界逐渐降低，甚至威胁风电机组的正常运行，因此叶片气弹稳定性分析将是未来大型叶片结构设计的必要内容，通过结构设计提高叶片的气弹稳定性具有重要意义 [6]。

##### 3. 风电试验平台

国内厂商进行产品性能试验时，多出于产品认证和市场准入的需要，而整机厂商和零部件厂商出于自身技术研发和产品优化需要而开发的试验平台或者制订的试验标准则一直比较缺乏。由于试验平台和标准涉及的上下游厂商较多，关系到从理论到实践的成果转化，需要行业标准归口单位组织众多厂商深入论证，并积极开展实质性的协作，真正推动产业技术成长。

## （二）数字化风电技术发展趋势和需求

### 1. 风电智能监控

风电场智能化监控可以带来非常大的商业价值，具体需求主要包括：风电机组和风电场综合智能化传感技术、风电大数据收集、传输、存储、整合及快速搜索提取技术；风电场中不同制造商风电机组间通信兼容解决方案，建立风电场监控系统信息模型；大型风电场群远程通信技术，开发风电场间通信协议及数据可视化展示平台，实现风电场信息的无缝集成等。

### 2. 风电智能运维

风电场智能化运维技术正在向着信息化、集群化的方向发展。通过智能控制技术、先进传感技术以及高速数据传输技术的深度融合，综合分析风电机组运行状态及工况条件，对机组运行参数进行实时调整，实现风电设备的高效、高可靠性运行。

风电运维与信息技术的深度融合包括建立包含风电场群运行数据、气象数据、电网信息、风电设备运行信息的物联网大数据平台，通过多风电场群协同控制和综合分析，加强风电机组智能控制和发电功率优化；以可靠性为中心的风电场维修理论，按照以最少的维修资源消耗保持设备固有可靠性和安全性的原则，应用逻辑决断的方法确定装备预防性维修要求的过程；基于云计算平台的风电大数据挖掘及智能诊断技术，将数据分析范围覆盖风场从设计建设到状态监测、故障诊断以及运营维护的全流程等方面。

### 3. 风电机组故障智能诊断和预警

当前风电机组的运维主要采用定期检修和故障后维修的“被动”维修方式，需要改变风电机组运行维护方式，充分利用风电状态监控，开展预警相关研究，变风电机组“被动”维修为“主动”维修，提高风电运维效率，增加风电开发收益。当前在役风电场均配有监控与数据采集系统（SCADA），具备多年运行积累的历史数据；2010年以来，为监测风电机组振动状态，新增风电机组都配有振动状态监测系统（CMS），基于大数据技术开展风电状态监控及智能预警研究已具备开展条件。结合机组主控制系统、SCADA数据和CMS数据，开展风电机组状态预测与故障诊断方法研究，开展振动信号检测与分析研究，对风电机组关键部件故障进行特征

提取与精确定位，并结合疲劳载荷分析和智能控制技术，对风电机组进行健康状态监测、故障诊断、寿命评估及自动化处置已经成为各个厂商都在积极投入的技术方向。

## （三）电网友好型技术发展趋势和需求

我国风电的接入形式正从单一的集中接入远距离输送向多元化方式发展，分散式接入和微网应用正成为日益发展的趋势。在全新的应用场景下，风电将更为直接地面对用户需求，而用户对于风电的电品质也将提出更高的标准。

欧美国家在风电的分散式应用方面发展较我国成熟，但接入标准根据市场发展情况也在不断完善中，以美国为例，UL 1741标准在2016年年底对分散式接入电源的故障穿越、频率支持和孤岛保护等方面提出了一系列的新要求，其技术方向和适用性非常值得我国参考。

未来风电电源和传统电源、储能、负荷、其他新能源、充电桩和智能配电保护系统等都会产生更多元和深入的互动，在运行控制、信息交互和安全方面必将有广阔的发展空间。

## （四）风电新概念技术发展趋势和需求

从长期来看，风电等可再生能源的综合利用仍然处于起步阶段，在低碳环保可持续发展理念下，风电机组技术未来也会发展出一些全新的理念，新的材料和工艺也将不断被利用到风电机组中，使我们能更高效、更灵活、更低成本地获取风能，较为典型的如采用碳化硅（SiC）器件的变流技术、叶片编织成型技术和多叶轮结构等。

截至2017年年底，我国已有超过10万台风电机组并网运行，按使用寿命20年计算，到2027年，我国就将每年面临近万台风电机组的退役问题。尽管良好的故障监控技术与运维技术可以有效增长机组使用寿命，但退役的风电设备如何安置处理，已经是一个不可忽视的问题。目前国内该领域研究关注度不高，且多处于探索阶段，如叶片及永磁材料的分解回收方法等，但技术和商业可行性仍有待验证。

## 四、结语

近年来，我国有关部门组织进行了我国风能



资源技术可开发量与经济可开发量的研究和统计分析。由于风电机组技术的进步,可利用的风能资源储量不断扩大,只要对当前的资源条件进行精耕细作的开发,完全能满足当前制订的2030年非化石能源指标[7],而欧美各国的先进经验也为我国实现高比例、高渗透的可再生能源发展目标提供了很好的借鉴。

在我国《可再生能源“十三五”发展规划》确定的目标下,2017年国家和地方层面推出了一系列的产业政策,海上风电和分散式风电成为明确的市场导向,这为风电机组制造行业进行技术开发和产业升级提供了很多创新的思路 and 空间,在“一带一路”政策的引领下,我国的风电机组也将更为积极地走向海外市场。与此同时,随着风电在电力系统中比例越来越高,电能传输和应用的方式也变得越来越丰富,需求变得越来越个性化,这些都为我国风电机组产业健康发展和技术持续进步提供了勃勃生机。

在目前的国内和国际市场,风电的低价格呈现遍地开花的趋势,在摩洛哥、印度、墨西哥和加拿大,风电上网价格最低达到了0.03美元/kW·h。2017年,在德国的招标中出现了全球首个“无需补贴”的海上风电项目,这使得欧洲新增3GW海上风电的成绩充满了说服力。风电电价的大幅下降正在给产业链的上下游带来巨大的压力,挤压其利润的空间,但是风电机组技术的发展也为实现该目标做出了持续的努力。

中国风电机组技术下一步的发展方向将立足于我国风电开发的需求和特点,积极参与国际市场竞争,不断提升大型先进风电机组的理论研究水平,完善风电设备供应链,使创新设计与智能制造实现有机结合,确保风电机组的质量和可靠性,发掘和

巩固核心竞争力,减少同质化竞争。风电设备制造企业也必将成为技术创新领域的主体,以科技推动产业进步、以科技带动风电产业化发展。

#### 参考文献

- [1] 中国电力企业联合会. 2017年全国电力工业统计快报数据一览表 [EB/OL]. (2018-02-05) [2018-03-15]. <http://www.cec.org.cn/guihuayutongji/tongjixinxi/niandushuju/2018-02-05/177726.html>. China Electricity Council. Data list of national electric power industry statistics bulletin in 2017 [EB/OL]. (2018-02-05) [2018-03-15]. <http://www.cec.org.cn/guihuayutongji/tongjixinxi/niandushuju/2018-02-05/177726.html>.
- [2] 姚兴佳,刘颖明,宋筱文.我国风能技术进展及趋势[J].太阳能,2016(10):19-30.  
Yao X J, Liu Y M, Song Y W. The development and trend of wind energy technology in China [J]. Solar Energy, 2016 (10): 19-30.
- [3] 郑军.高温超导电机技术研究现状与应用前景简析[J].新材料产业,2017(8):60-65.  
Zheng J. Research status and application prospect of high temperature superconducting motor technology [J]. Advanced Materials Industry, 2017 (8): 60-65.
- [4] 潘再平.一种利用高空风能进行发电的新方法[J].太阳能学报,1999,20(1):31-36.  
Pan Z P. A new means of generating electricity using upper atmospheric winds [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 1999, 20(1): 31-36.
- [5] 俞增盛,吴俊.高空风力发电技术与产业前景综述[J].上海节能,2017(7):379-382.  
Yu Z S, Wu J. Overview of high attitude wind power generation technology and industry prospect [J]. Shanghai Energy Conservation, 2017 (7): 379-382.
- [6] 徐宇,廖猜猜,张淑丽,等.大型风电叶片设计制造技术发展趋势[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2016,46(12):1-10.  
Xu Y, Liao C C, Zhang S L, et al. Developing trend of design and manufacture technology [J]. Scientia Sinica Physica, Mechnica & Astronomica, 2016, 46(12): 1-10.
- [7] 刘昌义.我国风能发展的经济与政策分析[J].阅江学刊,2018(1):118-130.  
Liu C Y. Economic and policy analysis of wind power development in China [J]. Yuejiang Academic Journal, 2018 (1): 118-130.