

风力发电技术

赵永强¹、李俊峰、许洪华²

国际发展趋势

近二十多年,国际上大型风电技术日趋成熟,发电成本持续下降,产业不断成长壮大。

在技术上,风电国际风电业长期致力于提高风电机组系统安全性和可靠性、开发更大型风电机组和超大型近海专用风电机组、采用新型机组结构和控制方式及材料、改善风电场选址和设计技术,以不断降低风力发电成本和扩大可经济利用风能资源量。目前,2~3MW 单机容量机组已成为国际主流风电机组并可实现无人值守长期运行,5MW 近海专用机组已投入试运行;新增 MW 级机组中普遍采用变桨距双馈式变速恒频和无齿轮箱直驱永磁风电机组技术,一些机型采用了综合上述两种技术优点的混合传动控制技术;主流机组已普遍采用轻质高性能玻璃纤维叶片,更大的 5-10MW 叶片则开始尝试应用碳纤维材料,从而提高了各种风况下的风能利用率和系统可靠性。

通过技术进步,目前商业化风电机组的可利用率已经达到 98%,安全性和噪音水平符合达到相关要求,风能利用系数达到 0.5,接近理论的贝兹极限值 0.593,风电占电网容量的比例可以达到 20%,发电成本已从 10.9 美分/千瓦时下降到 4.0 美分/千瓦时,2010 年可望降到 2.11 美分/千瓦时。截止到 2004 年底,全球风电累计装机量达

¹ 赵永强、李俊峰 国家发展和改革委员会能源研究所

² 许洪华 中国科学院电工研究所

到约 48GW，新增装机量年增长率在过去 5 年中平均达到 15.8%，且该增长速度有望延续到 2010 年。

最近数年来，随着风电产业的发展和大型企业（如美国 GE、德国西门子）的加入，国际风电制造业竞争日趋激烈，行业集中度不断上升，前 4 家和前 10 家企业分别占据全球市场的 80%和 96%，标志着国际风电制造业的不断成熟和市场竞争日趋激烈。（BTM，2005）

国内风电市场需求

自 20 世纪 90 年代中期以来，我国陆续制定实施了风电相关优惠政策法规和重大国家项目，特别是风电特许权项目和《可再生能源法》，从而建立扩大了国内风电市场，较为有力地推动了国内风电产业的起步和规模化发展。2005 年底，全国风力发电装机达到 126 万千瓦，年增长速度超过世界平均水平，达到了 70%。

2002 年以来，国家发改委积极推进大型风电场特许权项目，推动风电业加速进行规模化发展。此类项目通过选择 10 万千瓦级的大型风电场，规定风机容量及国产化率要求，公开招标选择项目开发商并确定上网电价，政府承诺按该价格全部收购风电场所发电量。目前，国家发改委已经批准了八个风电特许权示范项目，国产化率要求从 50%提高到 70%，总规模超过 100 万千瓦，招标价格为 0.426-0.60 元/千瓦时。目前，国家发改委已经要求各地在今后五年内提出另外 20 个风电特许权项目建议，每个项目规模为 10 万千瓦到 20 万千瓦，并且设想建立几个百万千瓦级超大型风电基地。但是有些项目招标电价

过低，开发商很难有合理利润，且目前特许权招标的项目还没有安装运行风电机组，是否成功还有待实际项目运行考验。2005年，我国制定颁布了《可再生能源法》，规定了包括风电在内的各种可再生能源发展支持优惠政策机制。在巨大风电市场潜力鼓舞下，众多企业已迅速投入兆瓦级机组技术引进和研制，意欲迅速进入并抢占风电制造市场。

产业化开发进展

我国在九五期间，利用攻关计划重点对600千瓦三叶片、定桨距、失速型、双速发电机的风电机组进行了研制，掌握了整体总装技术和关键部件叶片、电控、发电机、齿轮箱等的设计制造技术，并初步掌握了总体设计技术。对变桨距600千瓦风电机组也研制开发了样机。十五期间，国家利用科技攻关对750千瓦的失速性风电机组的产品化和产业化进行攻关。目前，600千瓦和750千瓦定桨距失速型机组已经成为经市场验证的、批量生产的主要国产机组。截止到2004年底，国产机组累计装机量13.6万千瓦，其中11万千瓦为600千瓦以上单机容量机组，分别占全国累计风电装机量76.4万千瓦的17.8%和14.4%。

但是，由于国际上风电技术发展迅速，当前阶段国产主流机型600千瓦和750千瓦定桨距失速型机组的技术已经相对落后、单机容量偏低、发电成本偏高，难以满足风电设备市场的竞争要求，已经面临着被市场淘汰的威胁，对国家和企业意味着巨大经济和时间损失。

在国产 600 和 750 千瓦机组的基础上,十五期间科技部还在“863”计划和攻关计划中支持国内数家企业通过与国外企业联合设计或国内机构自主设计的方式实施了 MW 级风力发电机组及其关键部件研制项目,以尽快追赶世界主流机型先进技术。(1)兆瓦级直驱式变速恒频风电机组研制项目,采取和国外公司合作设计、在国内采购生产主要部件组装风电机组的方式进行,完成了整机的计算机模拟分析计算和设计、各主要子系统和零部件技术要求的制订以及主要结构件的详细设计。前两台样机已经于 2005 年投入试运行,国产化率分别达到 25% 和 90%。该项目完成后,国内将形成具有国内自主知识产权的 1.2MW 直接驱动永磁风力发电机组机型,同时初步形成大型风电机组的自主设计能力以及叶片、电控系统、发电机等关键部件的设计和批量生产能力。(2)兆瓦级变速恒频风电机组研制项目,完全立足于自主设计,技术方案采取双馈发电机、变桨距、变速技术,完成了总体和主要部件设计、缩比模型加工制造及模拟试验研究、风电机组总装方案的制定,其中兆瓦级变速恒频风电机组多功能缩比模型填补了我国大型风电机组实验室地面试验和仿真测试设备的空白。首台样机已经于 2005 年投入试运行。该项目完成后将形成 1MW 双馈式变速恒频风电机组机型和一套风电机组的设计开发方法,为全面掌握风电机组的设计技术提供了基础。

在市场的激励下,2004 年以来进入风电制造业的众多企业还自行通过引进技术或通过自主研发迅速启动了 MW 级风电机组的制造。其中一些企业与国外知名风电制造企业成立合资企业或向其购买生

产许可证，直接引进国际风电市场主流的成熟机型的总装技术，在早期直接进口主要部件，然后努力消化吸收、逐步实现部件国产化。另一些企业与国内大学和研究机构合作完全自主研发机型。这些企业将在近期陆续生产出整机并投入（试）运行。

总体上看，当前国内众多整机制造企业引进和研制的各种型号 MW 级机组（容量为 1MW-2 MW，技术形式包括失速型、直驱永磁式和双馈式），如果顺利的话，可望在 2007 年之前投入批量生产。据粗略统计，国内风电整机制造企业的 2010 年规划产能总和达到 4000MW/年。然而，目前国内能够主导市场方向的产品，仍然是国家科技攻关计划和“863”计划安排的产品，例如，金风科技生产的 750kW 和 1.2MW 的 2006 年国内订货分别超过了 200 台和 100 台，约占 2006 年计划投产规模的 30%以上。

风力发电机组主要零部件包括叶片、主齿轮箱、发电机、电控系统、偏航装置和塔架。目前，国内配套企业已能够批量生产 750 千瓦以下单机容量风电机组的各种零部件，目前正在按照风电机组总装企业的配套要求和风电业发展趋势为 1-2W 级变速恒频风电机组研制各种部件并积极扩大整个系列产品的产能。这表明这几个部件的国产化已经具有比较坚实的基础。但是，MW 级机组控制系统是薄弱环节，还依赖进口或仍有待于国内高校和研究机构的研发。

大型风机叶片曾是中国风电国产化的主要瓶颈。在“九五”和“十五”期间，中国政府支持国内企业中航（保定）惠腾风电设备有限公

司通过参考国外先进技术进行积极创新，已掌握了 600 千瓦和 750 千瓦叶片的设计制造技术并实现产业化，形成了研制 MW 级容量叶片的技术队伍和创新能力并于 2005 年研制出了 1.3MW 叶片。该企业也成为国内最主要的叶片供货商，目前其产能可达到约 1000MW/年。另外，国内其它的叶片供货商还有上海玻璃钢研究所以及国外公司在华设立的叶片制造企业，可生产 250kW - 2MW 级叶片。

风电机主齿轮箱是联结风轮机和发电机的增速传动部件，应用于目前的绝大部分风电机机型中。目前，国内有数家企业具有大型风电机主齿轮箱批量生产能力，可实现 1.5MW 以下齿轮箱的批量生产，近期应风电机组总装企业的订单要求正在研制更大容量的齿轮箱。在市场需求推动下，均在扩大产能，近两年可能超过 1000MW/年。

国内大型风电用发电机的研制生产起始于 20 世纪 90 年代初，在国内坚实的电机工业基础上以及国内风电市场的拉动下，目前已有多家企业已形成 750kW 级发电机的批量生产供应能力，并在近两年内研制出了 MW 级双馈型发电机并投入试运行。近期，受风电市场的需求拉动，主要生产企业均启动了新型大容量风电用发电机及控制系统的研制并计划扩大生产能力，国内发电机的总产能在近期可望达到约 1500MW/年。

风电机组电控系统是内风电机组制造业中最薄弱的环节，过去数年中最主要的生产企业有生产电控设备的企业有科诺伟业公司、新疆工学院、金风公司，目前一些整机制造企业、发电机制造企业及大

学和研究所正在针对 MW 级变速恒频风电机组引进或研制电控系统。

另外，经过长期的努力，我国已具有离网型小风机风力提水机的自主研发和批量生产能力。目前，国产小风机的单机容量从 100W 到 10 千瓦，不但在国内广为应用，并有小量出口。据对全国 22 个小风电系统制造企业的统计，2004 年生产量约为 2.5 万台，机组容量为 1.1 万千瓦，相比 2003 年分别增长了 24.3% 和 85.7%。截止 2004 年底，全国累计共生产微小型风力发电机组 29 万多台，总装机容量 8.9 万多千瓦，年发电量约 9.2 万千瓦时，为满足偏远无电地区和人口的电力需要作出了重要贡献。在风力提水机组的产品品种上，我国已基本形成南方型低扬程大流量风力提水机组和北方型高扬程小流量风力提水机组两大系列，约有十几种产品型号。经过严格的生产考核运行和多年的实际应用，这些机组的产品质量基本可靠，有些机组的水平达到或处于国际领先地位。

存在的问题和对策

目前，我国的风电产业还面临如下问题：国家投入不足、研究开发的系统性、完整性及连续性不够、尚未形成完整的工业基础，不足以支撑国家风力发电快速健康和稳定发展的市场需求。具体地，国内风电制造业的技术研发能力，尤其是基础理论研究和机组总体设计能力比较薄弱，难以实现机型快速升级更新并确保机组设计科学合理和运行稳定可靠；众多企业在新型机组开发过程中有赖于技术跟踪和引进，且经常只能引进和掌握整机制造技术，难以切实做到机组设

计技术引进消化吸收再创新；部分总装企业表现出急功近利、对设计能力重视不足和不按科技工程规律行动的问题。国际上领先风电技术和产品进步很快，我国企业的产品升级更新和批量化生产进程慢，导致技术追赶和维持盈利的挑战很大；例如，首批6家企业推出新机型动作非常慢、数量少；另外国内刚刚完成定型、实现批量化生产的750千瓦定桨定速型风电机组已经面临着被市场淘汰的威胁，这意味着国家和企业的巨大经济和时间损失。

为解决上述问题，我国需在十一五期间加大国家科技投入，重点建立发展完整的风电工业体系，从整机总体设计总装技术、零部件生产，到机组部件运输、安装和维护等服务体系的研发均要有总体的部署和安排，争取利用10年的时间，即在2015年之前，建立完整的国内风力发电产业体系，形成具有自主创新能力和市场竞争力的3-5家大型风电整机制造企业和20家左右零部件生产企业，年产量200万千瓦的整机组装能力和300-500万千瓦的零部件配套能力。总体目标是届时国产化风机国内市场份额超过50%，零部件供应超过78%。

注：此文发表于《中国能源科技专辑》