

当前风电设备技术发展现状及前景

中国农业机械工业协会风力机械分会 ■ 沈德昌

摘要：概括介绍了当前风电机组的主要类型、技术成熟度和发展前景。

关键词：风电机组；发展现状；发展前景

0 引言

近年来由于风电产业的快速发展，一些原来从事火电、水电和核电专业的人员也转入风电行业工作。为了使这些专业人员能够尽快进入角色，对当前的风电机组技术有一个比较概括的了解，本文概括介绍了当前陆上和海上风电机组的主要类型、技术成熟度和发展前景。

1 中小型风电机组技术

1.1 水平轴风电机组

一般功率为 100 ~ 5000 W 的水平轴风电机组都是离网型风电机组。此类风电机组是由 3 个定桨距叶片组成的风轮驱动永磁发电机发电，发出的电经控制器整流成直流电充入蓄电池储存，蓄电池里的直流电经逆变器转换成交流电后，输出 220 V 交流电带动用电器工作。这类风电机组多用于为发展中国家远离电网地区的农牧民家庭供电。

功率为 5 ~ 10 kW 的水平轴离网型风电机组

一般是由 3 个机械变桨距叶片组成的风轮驱动永磁发电机发电，发出的电经控制器整流成直流电充入蓄电池储存，蓄电池里的直流电经逆变器转换成交流电后，输出 220 V 交流电带动用电器工作。这类风电机组多用于为发展中国家和部分发达国家远离电网地区的农牧民家庭供电或社区供电。

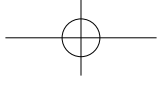
功率为 10 ~ 200 kW 的水平轴并网风电机组一般是由 3 个电动变桨距叶片组成的风轮驱动永磁发电机发电，发出的电经控制器整流成直流电后输入并网逆变器，经逆变器转换成交流电后将电能输送到电网，或输出 220/380 V 交流电带动用电器工作。这类风电机组多用于发达国家农场主或中小企业的分布式生产用电。

1.2 垂直轴风电机组

目前垂直轴风电机组的额定功率一般为 300 W ~ 50 kW。此类风电机组是由 3 个以上叶片组成的垂直轴风轮驱动永磁发电机发电，发出的电经控制器整流成直流电充入蓄电池储存，蓄电池

收稿日期：2018-03-07

通信作者：沈德昌 (1947—)，男，本科、研究员，主要从事国内外风电行业发展现状与趋势方面的研究。shendc@cweea.com.cn



里的直流电经逆变器转换成交流电后, 输出 220 V 交流电带动用电器工作。风力机由钢轴式塔架支撑, 发电机和控制系统位于塔架下部, 便于维修。垂直轴风电机组风轮的旋转轴垂直于地面或气流的方向。垂直轴风电机组在风向改变时无需对风, 这相对于水平轴风电机组而言是一大优势, 它不仅使结构设计简化, 而且也减少了风轮对风时的陀螺力。

从空气动力学角度来看, 垂直轴风电机组主要分为阻力型和升力型。阻力型垂直轴风电机组主要是利用空气流过叶片产生的阻力作为驱动力, 而升力型则是利用空气流过叶片产生的升力作为驱动力。由于叶片在旋转过程中, 随着转速的增加, 阻力急剧减小, 升力反而会增大, 所以, 升力型垂直轴风电机组的效率要比阻力型的高很多。目前, 市场上垂直轴风电机组的功率多为 300 W ~ 50 kW 的升力型机组。

国内曾尝试研制过 MW 级垂直轴并网型风电机组, 但是至今未实现产业化。丹麦 AWP 公司已研制出 750 kW 的可变桨距的垂直轴并网型风电机组, 并正在研制 2 MW 的同类型风电机组。

2 大型并网型风电机组技术

2005 年以前, 定桨距风电机组曾是全球风电场建设的主流机型, 如金风科技公司早期生产的功率为 750 kW 的定桨距风电机组。

由于变桨距的功率调节方式具有载荷控制平稳、安全和高效等优点, 2005 年以后, 变桨距在大型风电机组上得到了广泛应用。结合变桨距技术的应用及电力电子技术的发展, 大多数风电机组制造厂商采用了变桨变速恒频技术, 并开发出了液压变桨变速风电机组和电动变桨变速风电机组, 使风能转换效率有了进一步的提高。2014 年以后, 世界上新安装的大型并网型风电机组全部采用了变桨变速恒频技术。变桨变速恒频技术将在今后很长一段时期内存在并发展。

2.1 双馈异步发电技术现状和趋势

双馈异步式风电机组是由变桨距风轮通过高速齿轮箱驱动双馈式发电机发电, 发电机转子通过变流器向电网馈电, 定子电流直接向电网馈电的风力发电系统。

从目前来看, 双馈异步发电机变速恒频风电机组是世界上技术最成熟的变速恒频风电机组。欧美多家领先的风电机组制造商, 如, 丹麦维斯塔斯、西班牙歌美飒、美国 GE 风能、印度苏司兰、德国 Nodex 等都在批量生产此类风电机组。近 10 年来, 1.5 ~ 4 MW 的双馈异步发电机变速恒频风电机组在全球风电场的建设中发挥了主力军的作用。

我国多数风电机组制造企业, 如, 远景能源、国电联合动力、广东明阳、上海电气、中国海装、东方电气、浙江运达和华锐风电等都在生产双馈异步发电机变速恒频风电机组。2016 年我国新增的风电机组中, 双馈异步发电机变速恒频风电机组占比约为 61%。目前, 我国 2 MW 双馈异步发电机变速恒频风电机组的技术已经非常成熟, 并已成为主流机型。华锐风电研发的 3 MW 的此类风电机组已在海上风电场批量应用。国电联合动力研发的 6 MW 此类风电机组也已安装试验。

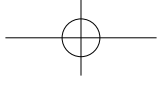
预计到 2020 年, 我国新增风电机组中, 双馈异步发电机变速恒频风电机组的占比仍将超过 50%。

但是由于直驱式和半直驱风电机组技术的不断成熟和发展, 双馈异步发电机变速恒频风电机组的竞争性将不断下降, 预计到 2030 年以后, 此类风电机组将逐步退出风电市场。

2.2 直驱永磁式风电机组技术发展成熟

直驱永磁式风电机组是由变桨距风轮直接驱动永磁发电机发电, 通过全功率变流器向电网馈电的风力发电系统。

无齿轮箱的直驱方式能有效减少由于齿轮箱问题而造成的机组故障, 可有效提高系统运行的



可靠性和寿命,减少风电场维护成本,因而直驱永磁式风电机组逐步得到了市场的青睐。

金风科技生产的 1.5 MW 直驱永磁式风电机组已有 1 万多台安装在风电场,并且该公司研制的 2 MW 和 2.5 MW 直驱永磁式风电机组也已批量投放至国内外市场。

湘电公司的 2 MW 直驱永磁式风电机组已大批量进入市场,5 MW 的此类机组也已安装运行。其他公司,如,华创风能、东方电气、北车集团、潍坊瑞其能等风电机组制造企业也在生产此类机组。2016 年,我国新增大型风电机组中,永磁直驱式风电机组的占比达 34% 以上。

由于直驱永磁式风电机组技术的不断成熟和发展,其市场占有率逐年上升。欧美主要风电机组制造商也逐步转向研制大型直驱永磁式风电机组。如,西门子公司已研制出 SWT-6.0-154 直驱永磁式新型海上风电机组,该机组的风轮直径为 154 m,风轮直接驱动永磁发电机,风轮轴后倾 6°,机组额定功率为 6 MW,塔架上部重量仅为 360 t。

位于英国东海岸的 Westernmost Rough 海上风电场共安装有 35 台西门子 6 MW 直驱永磁式风电机组,装机容量为 210 MW,2015 年 5 月底已实现满功率运行,足以满足超过 15 万户英国家庭每年的电力需求。2017 年底,西门子 8 MW 直驱永磁式风电机组也已通过 DNV-GL 型式认证,该机组将应用于法国的圣布里厄海上风电场。

此外,2015 年,美国 GE 风能公司收购了阿尔斯通公司的风电业务,拥有了该公司研发的 GE-Haliade150 型 6 MW 直驱永磁式海上风电机组技术。这款新一代海上风电机组采用无齿轮箱的直驱结构,并采用液压冷却的永磁发电机,所以设备内部的机械部件较少,故障率更低,机组运行更为可靠,也更有助于降低运行和维护成本。该机组的风轮直径为 150 m,叶片长度为 73.5 m,叶片表面由聚氨酯腹膜覆盖,且在其迎风边做了抗腐蚀处理。这款机型是专门针对海上环境而设

计的,美国第一个 30 MW 海上风电场就安装有 5 台此类风电机组。

金风科技公司 2017 年推出了 6.45 MW 的直驱永磁式大型海上风电机组,并将在江苏大丰、辽宁大连等海上风电场安装投运。

直驱永磁式风电机组发展形势稳定向好,预计到 2020 年,我国新增风电机组中,此类风电机组将占到 45% 以上的市场份额。

2.3 直驱励磁式风电机组技术发展成熟

直驱励磁式风电机组是由变桨距风轮直接驱动励磁发电机发电,通过全功率变流器向电网馈电的风电系统。

德国 Enercon 公司在 21 世纪初开发了直驱励磁式全功率变流风电机组,功率涵盖 1.5~7.5 MW,在欧洲风电场得到了广泛应用。该公司近年来研制的新一代 E-126 大型直驱励磁式风电机组的风轮直径为 127 m,轮毂高度为 198 m;单机容量为 7 MW;采用 2 段式叶片,便于运输和现场组装;叶片采用“小翼”叶尖,可在风轮平面内抑制生成扰流和旋涡,从而降低噪声,提高发电量;叶片法兰直径大,采用双列螺栓连接;采用直驱励磁式发电机,全功率变流器;采用混合式塔筒-钢制顶段,其余由混凝土建造,塔底直径为 14.5 m。新一代 7 MW 及其前身 6 MW 直驱励磁式风电机组已在欧洲陆上风电场批量安装,并网发电。

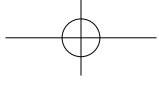
此外,我国的航天万源公司生产的直驱励磁式风电机组也已在陆上风电场得到应用。

预计大型直驱励磁式风电机组今后的发展形势稳定,将成为 21 世纪全球风电场建设的主流机型之一。

2.4 半直驱永磁式风电机组技术取得成功

半直驱永磁式风电机组是由变桨距风轮驱动中速齿轮箱,再由齿轮箱驱动永磁发电机发电,通过全功率变流器向电网馈电的风电系统。

法-德合资的 Areva Multibrid 公司研制的半直驱永磁式 5 MW 风电机组已在海上风电场批量投入运行。该机组额定功率为 5 MW,风轮直径



为 116 m; 采用集成化设计, 将风力机的主轴、齿轮箱、高速轴和发电机集成在一起, 以减少重量, 从而降低成本。此类风电机组的功率传动路线为: 风轮 - 单级齿轮箱 (1:9.92) - 永磁发电机 - 全功率变流器。此系统采用折中方案, 兼顾了双馈式风电机组和直驱式风电机组的优点, 并考虑了性价比。

日本三菱重工和丹麦 Vestas 公司合作研制了 164-8.0 MW 半直驱永磁式新型海上风电机组。该机组采用 1 个中速齿轮箱、永磁发电机和全功率变流器。随着 164-8.0 MW 半直驱永磁式风电机组成功投入运行, 将使海上风电场业主的海上风电收益率达到一个新的水平。此类风电机组可最大化捕获能量, 不仅是因为其拥有直径 164 m 的巨大风轮, 还因为其风轮与发电机的比例得到了优化。由于选择 164-8.0 MW 半直驱永磁式风电机组建设的海上风电场可以采用较少数量的大型风电机组, 从而减少了风电场的运行和管理成本; 再加之该机组的设计寿命是 25 年, 产业标准突出, 可使投资商的投资回报实现最大化。该机组的设计理念是: 可靠性高、可预测、保障寿命期性能、尽可能减少维修次数, 需要维修时, 尽量做到安全、快捷和低成本。

广东明阳风电公司研制了 SCD 6.5 MW 超紧凑半直驱永磁式海上风电机组, 该机组采用两叶片风轮、液压独立变桨、中速齿轮箱驱动永磁同步发电机的发电技术, 发出的电通过全功率变流器馈入电网。该系统具有高发电量、高可靠性、低度电成本、防盐雾、抗雷击、抗台风等独特优势。与传统的风力发电技术相比, 此类风电机组的关键技术和优势主要体现在超紧凑的传动链、轻量化结构、集成化液压系统、全密封设计 4 个方面。

2.5 鼠笼式感应发电机全功率变流风电技术

鼠笼式感应发电机全功率变流风电机组是由变桨距风轮通过高速齿轮箱驱动鼠笼式感应发电机发电, 通过全功率变流器向电网馈电的风电系统。

西门子公司的 2.3 MW 和 3.6 MW 海上风电

机组就采用了由液压变桨风轮驱动高速齿轮箱, 带动鼠笼式感应发电机发电, 通过全功率变流器向电网馈电这种技术路线。这两种海上风电机组已经在海上风电场大批量应用, 属于经受住考验的成熟机型, 也是 2016 年以前海上风电场的主流机型。

上海电气引进西门子技术研制的 4 MW 海上风电机组也采用了这种技术路线, 并且在我国近海风电场批量投入运行。

与鼠笼式感应发电机全功率变流风电机组类似的还有高速永磁式全功率变流风电机组。高速永磁式全功率变流风电机组是由变桨距风轮通过高速齿轮箱驱动高速永磁发电机发电, 再通过全功率变流器向电网馈电的风电系统。重庆海装风电研制的 H127-5 MW 风电机组就属于这种类型。

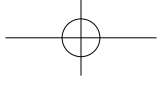
2.6 低风速风电机组

针对我国大多数地区处于低风速区的实际情况, 我国风电企业通过技术创新, 研发出具有针对性的风电机组产品及解决方案, 最为明显的特征是风轮叶片更长、塔架更高、捕获的风能资源更多。

以 1.5 MW 风电机组为例, 在国内提供 1.5 MW 风电机组的 30 余家企业之中, 已有 10 多家具备了直径 90 m 以上风轮直径机型的供应能力。在 2 MW 级机型中, 远景能源、国电联合动力、明阳智慧、金风科技、中国海装等公司的 2 MW 低风速风电机组的风轮直径已达到 121 m 以上。金风科技公司的 3 MW 低风速风电机组的风轮直径已达到 140 m 以上。这些低风速风电机组在我国中、南部省份的风电场建设运行中发挥了较好的作用。

2.7 其他适合特殊气候环境的风电机组

由于我国北方具有沙尘暴、低温、冰雪、雷暴, 东南沿海具有台风、盐雾, 西南地区具有高海拔等恶劣气候特点, 恶劣气候环境已对风电机组造成很大的影响, 包括增加维护工作量、减少发电量, 严重时还会导致风电机组损坏。因此,



在风电机组设计和运行时,必须具有一定的防范措施,以提高风电机组抗恶劣气候环境的能力,减少损失。近年来,我国的风电机组制造商已开发了抗风沙型、抗低温型、高原型、低风速型等适应恶劣气候环境的各类风电机组,确保了风电机组能够在恶劣气候条件下的风电场可靠运行,并有效地提高了发电量。

3 海上风电技术

3.1 当前的技术状况

2013年以后,英国、德国和我国的海上风电场建设项目开始加速。欧洲主要风电机组制造商加速了大型海上风电机组的研制。2015年以后,西门子公司研制的直驱永磁式6 MW海上风电机组已经在欧洲海上风电场投入并网运行。2016年,日本三菱公司与丹麦Vestas公司联合研制的8 MW半直驱永磁式海上风电机组及其支撑基础取得成功。海上专用运输吊装船只和专用运行维护设备的研究也取得了重大进展。到2017年,欧洲海上风电场投入运行的最大海上风电机组的单机容量已达到8 MW,欧洲海上风电设备进入8 MW时代。

欧洲海上风电场多为近海风电场,而今年英国和德国又开发了深海风电场。海上风电场的规模一般比陆上风电场要大,多为300 MW以上。

在我国,随着海上风电场规划规模的不断扩大,各主要风电机组整机制造厂都积极投入到了大功率海上风电机组的研制工作中。华锐风电率先推出3 MW海上风电机组,并在上海东海大桥海上风电场批量投入,并网运行。金风科技在江苏大丰县海上风电机组研发基地研制的2.5 MW直驱式风电机组已在潮间带风电场批量应用,其6 MW直驱式海上风电机组也已安装运行。2016年7月底,10台由湘电公司研发的5 MW海上直驱永磁式风电机组已在福建莆田平海湾海上风电场成功并网发电。重庆海装完成了5 MW海上高速永磁风电机组的试运行。

国电联合动力研制的6 MW海上风电机组已安装并试运行。远景能源研制的4 MW海上风电机组已在江苏海上风电场并网运行。2016年,上海电气-西门子联合研制的4 MW海上风电机组都已批量应用于海上风电场,上海电气从西门子引进的6 MW直驱永磁式海上风电机组也已在2017年安装在福建海上风电场。

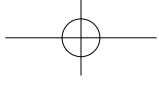
东方电气研制的5.5 MW高速永磁风电机组、广东明阳研制的6.5 MW中速传动永磁发电机全功率变流超紧凑型风电机组已取得新进展。南车株洲电力、浙江运达等也在全力研制大型海上风电机组。

3.2 海上风电技术的发展趋势

未来风电技术发展的驱动力主要来自蓬勃崛起的海上风电场建设,这一发展趋势已不可逆转。海上风电机组将继续向10 MW以上的大型化机组发展,并且支撑基础将从固定式走向漂浮式。海上风电场的规模也将继续向大型化发展,并且海上风电场将从近海走向远海,从浅海走向深海。

目前,漂浮式海上风电支撑基础主要有驳船式、半潜式、单柱式和张力腿式4类。其中,根据锚链的受力状态,又可将前3类归为悬链式支撑基础,最后1类为张紧式支撑基础。根据欧盟对新技术应用设定的成熟度等级划分,半潜式、单柱式漂浮支撑基础技术已经成熟。2017年10月,采用5台西门子6 MW直驱永磁风电机组和单柱式漂浮支撑基础、总装机容量为30 MW的漂浮式海上风电场在苏格兰海域建成投运。驳船式和张力腿式漂浮支撑基础将在2018年技术成熟,可以预见在不久的将来,很快就会出现这4类漂浮式支撑基础技术同场竞技的场景。

2018~2020年,全球海上风电场建设将进入高速发展新阶段。5~8 MW的海上风电机组将成为海上风电场的主流机型;单机功率为7~9 MW的海上风电机组的技术逐步成熟,将进入批量生产销售时期,并将成为海上风电场的主流机型;小批量10 MW的海上风电机组将进入海



上风电场。

2021~2030年,海上风电机组的主要机型将是由8~10 MW直驱永磁式风电机组和中速齿轮箱驱动的中速永磁式发电机组成的风电机组,且上述风电机组都将配备全功率变流器;小批量15~20 MW海上风电机组将进入海上风电场。总之,配备全功率变流器的各类大型风电机组将成为未来海上风电场的主流机型,而“高速齿轮箱+双馈式发电机”组成的大型风电机组将退出漂浮式海上风电场。

4 高空风力发电技术

4.1 目前高空风力发电的两种技术路线

目前高空风力发电的两种技术路线中,一种是利用氦气球等升力作用,将发电机升到半空中,在高空中利用丰富的风能转化为机械能,机械能转化为电能,之后将电力通过电缆传到地面电网。这一技术路线的典型代表为麻省理工学院Altaerosenergies的高空风电系统“空中浮动涡轮”。

另一种技术路线是将发电机组固定在地面,通过巨型“风筝”在空中利用风能拉动地面发电机组,从而将风能转化为机械能,带动地面的发电机将机械能转化成电能,从而解决电缆和发电机的自重问题。意大利KiteGen公司的MARS系统是这类技术路线的典型代表。

上述高空风力发电的两种技术路线都存在其自身缺陷:1)发电机在空中的“气球路线”,由于发电机及输电电缆的重量会随着容量的增加而增加,其升空高度受到限制,所以如何降低发电设备重量是该路线目前需要解决的问题。2)对于发电机位于地面的“风筝路线”,由于风筝的升空高度高、系统的建造难度低,该路线已经成为目前的主流技术路线。但是,其空中发电系统稳定性是这一技术路线所面临的最大问题,如何通过技术手段控制“风筝”在空中的运行轨迹,提高系统发电效率,保证系统持续运行是未来需要研究的主要问题。

4.2 风筝式高空风力发电装置

风筝式高空风力发电装置是指工作于距地面几百甚至上千米高度的风筝式发电机。在这一高度,大气层的风速和气流相对稳定,无紊流干扰,因而适用于利用风能进行长时间的发电。

这类发电装置的工作原理是:当筝面垂直于气流时,其拉力拖动绳索驱动地面上的卷扬机做功发电;当筝面平行于气流时,拉力最小,卷扬机倒转拉回风筝;由此,风筝反复做功发电。通过绞车滚筒连接一对风筝串联工作,当其中一只风筝上升到450 m的高度时,会拉动绞车滚筒上的绳索,使连接的另一只风筝相应下坠;然后2只风筝以数字“8”的运动轨迹上下浮动,如此反复,带动发电机连续发电。

相较于传统高塔式的风力发电机,风筝式发电机能够到达风源持久且强劲的高空中,发电效率更高;此外,风筝式发电机也不需要叶片、涡轮机或其他机械设备,建设成本低廉,且噪音污染小。

在国外,该领域的关键技术已取得突破。世界上首个规模化的风筝发电站是位于意大利的KiteGen Stem发电站,该电站于2015年4月投入运营,装机容量为3 MW,由意大利KiteGen公司负责建造。英国建造全球第2个规模化的风筝发电站,选址位于苏格兰的斯特兰拉尔郡附近,装机容量为500 kW,于2017年3月投入运营。

在风筝式高空风力发电装置方面,国内尚处于起步阶段,需解决突破高强度风筝设计制造技术、风筝筝面材料技术与地空缆索驱动技术,以及双向驱动发电机技术和装置控制技术等。预计到2025年,我国风电设备企业可开发出2 MW级风筝式高空风力发电装置。

5 结论

本文根据不同类型,分别对当前全球的陆上及海上风电机组的技术进行了介绍,并对各类型风电机组的未来发展趋势进行了预测。由于笔者研究水平有限,文中难免有表述不当之处、或者存在某些错误,欢迎读者提出修改意见。太阳能