

# 半直驱永磁式海上风电机组的发展

中国农机工业协会风力机械分会 ■ 沈德昌

## 0 引言

半直驱永磁式全功率变流风电机组是由变桨距风轮驱动中速齿轮箱，再由齿轮箱驱动中速永磁发电机发电，通过全功率变流器向电网馈电的风电机组。目前，这种风电机组在陆上风电场和海上风电场都有应用。陆上风电场应用的主要是 5 MW 以下功率的半直驱永磁式全功率风电机组，海上风电场应用的主要是 5 MW 及以上功率的半直驱永磁式风电机组。近年来，欧洲海上风电场已批量应用 8 MW 及以上功率的半直驱永磁式全功率变流发电机组。

## 1 早期的半直驱永磁式海上风电机组

2010 年以前，芬兰 Winwind 风电公司研制了 3 MW 半直驱永磁式全功率变流风电机组，并曾有少量样机在风电场安装运行，是最早应用于风电场的半直驱永磁式风电机组。

法德合资的 Areva Multibrid 公司研制了 5 MW 半直驱永磁式风电机组，并已于 2015 年在海上风电场批量投入运行。该风电机组的额定功率为 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，减轻了重量，从而降低了成本；其传动链为“风轮+单级齿轮箱(增速比为 1:9.92)+多级永磁发电机”。该系统采用折中方案，兼顾了双馈式风电机组和直驱式风电机组的优点，折中考虑了性能与价格的关系。

西班牙 Gamesa 公司研制出了 G128 型 5 MW 中速传动永磁式风电机组。该机组的风轮直

径为 128 m，轮毂高度为 120 m，机头重量为 250 t，属于一种大型化的半直驱永磁式风电机组。该机组采用两段式叶片(碳纤维)及混合式塔筒(混凝土+钢筒)，减少了设备材料投资；内置吊车，便于安装和拆卸部件；采用 1 个 2 级传动的行星齿轮箱、永磁发电机和全功率变流器，变流器由 6 个并联的 770 kW 变流器(IGBT)组成，提高了可靠性。该机型于 2012 年底完成认证测试，并于 2013 年在西班牙进行了首台样机的安装。

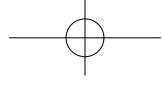
## 2 半直驱永磁式海上风电机组在应用方面取得的实质性进展

### 2.1 国外技术发展与应用情况

2016 年，日本三菱重工和丹麦 Vestas 的合资公司 MHI Vestas 研制了新型 V164-8.0 MW 半直驱永磁式海上风电机组，采用了中速齿轮箱、永磁发电机和全功率变流器。该机组在海上风电场的成功并网运行，使业主的海上风电收益率提高到了一个新的水平。能最大化捕获能量不仅是因为其拥有直径为 164 m 的巨大风轮，还因为其优化了风轮与发电机的比例，因此风电场可以采用较少数量的大型风电机组，进而减少了运行和管理成本；较少数量的风电机组也意味着较少的基础和电缆，由此也相应减少了投资风险。由于 V 164-8.0 MW 半直驱永磁式海上风电机组的结构设计寿命为 25 年，可以给风电场业主一个更长的发电期限，并增加业主的商业效益，因而可使投资商的投资回报实现最大化。该机组的设计理念为：可靠性高、可预测、保障寿命期机组

收稿日期：2019-06-28

通信作者：沈德昌(1947—)，男，研究员，主要从事风能设备和风电产业发展的研究工作。shendc@cweea.com.cn



性能先进；尽可能减少维修次数，需要维修时，可做到安全、快捷和低成本。2017年，32台V164-8.0 MW半直驱永磁式海上风电机组已在英国海上风电场成功并网运行。

2018年，由MHI Vestas公司研制的8.8 MW半直驱永磁式海上风电机组也已并网运行，成为目前欧洲大型海上风电场安装运行的最大的海上风电机组。同时，MHI Vestas公司又设计研发了10 MW半直驱永磁式海上风电机组，并预计于2021年投入海上风电场建设。

## 2.2 国内技术发展与应用情况

近年来，中国广东明阳智能公司（下文简称“明阳智能”）研制了MySE5.5/7 MW紧凑型半直驱永磁式海上风电机组。该机组采用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，采用液压独立变桨；具有高发电量、高可靠性、低度电成本、防盐雾、防雷击、抗台风等独特优势。

明阳智能采用的半直驱永磁式发电机技术路线具备如下竞争优势：

1) 采用半直驱中速永磁的传动链结构：综合了双馈式风电机组和直驱永磁式风电机组的优点，风轮转速范围宽，低风速性能好，中、高速发电效率高。

2) 紧凑传动链：主轴轴承及齿轮箱与发电机设计为一个紧凑整体，缩短了风轮与塔架之间的距离。

3) 中速齿轮箱传动：减少了轴承及滑动部件的磨损，提高了传动部件的可靠性，与高速齿轮箱传动相比，故障明显减少。

4) 密封性好：采用全封闭式的传动链结构，空气过滤处理，隔绝水气、盐分及沙尘，避免或减少了其对机舱和塔筒内部零部件和电气部件的影响。

5) 采用中速永磁发电机：重量比同功率低速永磁发电机轻，便于运输。

6) 采用全功率变流器：具有更宽的转速范围、更好的发电效率，以及更友好的并网特性。

7) 大数据平台：依托大数据平台，采用全球

领先的基于模型的控制(MBC)实现机组运行的自寻优，成就海上无人值守的智能化风电场。

明阳智能研制的MySE5.5-155紧凑型半直驱永磁式海上风电机组(Y8号)于2018年5月在三峡福建福清兴化湾海上试验风电场成功吊装。截至2019年6月8日，在此前的1个自然年内，该机组共发电2408万kWh，等效满发小时数4378 h，可利用率达99%以上，发电量在该试验风电场处于领跑地位。

2019年1月，明阳智能在广东省揭阳市海上风电场安装了7.25 MW紧凑型半直驱永磁式海上风电机组，是迄今为止在我国安装的最大功率的海上风电机组。

目前我国在建的海上风电场中，已中标200台明阳智能制造的单机功率在5 MW以上的半直驱永磁式海上风电机组，总装机容量超过110万kW。

## 3 已采用半直驱永磁式海上风电机组的海上风电场

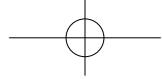
下文介绍了几个已采用半直驱永磁式海上风电机组的海上风电场。

### 3.1 英国 256 MW Burbo Bank Extension 项目

该项目由丹麦Dong Energy公司承建。Burbo Bank Extension风电场位于英国利物浦湾的布尔波海岸，由32台MHI Vestas公司提供的V164-8.0 MW半直驱永磁式海上风电机组组成。该机组叶片长度为80 m，每个叶片重35 t，轮毂高度为105 m，叶尖最高点可高于海平面195 m。由丹麦海上风电场安装和服务公司A2Sea采用A2Sea自升式(jack-up)海上风电机组安装船进行安装。2017年6月，32台机组全部安装及并网，且已投入商业运行。该风电场可向23万户家庭提供电力，每年减排二氧化碳36万t，减排二氧化硫8462 t。

### 3.2 德国 440 MW Borkum Riffgrund 2 海上风电项目

该项目地点距德国西北部海岸57 km，水深约30 m，由MHI Vestas公司提供的55台V164-8.0 MW半直驱永磁式海上风电机组组成。该



项目的预组装在丹麦的 Esbjerg 完成，并计划于 2019 年完成安装和调试，届时将成为德国装机容量最大的海上风电项目，可为 46 万户德国家庭送去清洁电力。

### 3.3 中国中广核广东阳江南鹏岛 40 万 kW 海上风电项目

该项目地点位于我国广东省阳江市阳东区东平镇南侧海域，北距南鹏岛约 4.6 km，中心距离阳江市陆域约 28.5 km，水深 20~30 m。项目总容量为 40 万 kW，由明阳智能提供的 73 台 MySE5.5-155 紧凑型半直驱永磁式海上风电机组组成。项目于 2017 年底开工，预计 2019 年完成安装调试。

### 3.4 中国粤电阳江沙扒一期 30 万 kW 海上风电项目

该项目地点位于广东省阳西县沙扒镇海域，离岸最近距离约 15 km，涉海面积约 48 km<sup>2</sup>。项目工程规划总装机容量为 90 万 kW，分期建设，一期装机容量为 30 万 kW，投资约 60 亿元，由明阳智能提供的 55 台 MySE5.5-155 紧凑型半直驱永磁式海上风电机组组成。项目 2017 年 10 月开工，预计于 2019 年 10 月首批机组并网发电，2020 年年底一期 30 万 kW 风电项目全部建成投产。

## 4 结论

近年来，随着海上风电机组大型化发展，欧洲已成功地利用 8 MW 及以上功率的半直驱永磁式海上风电机组进行了海上风电场的建设。我国半直驱永磁式海上风电机组采用模块化设计理念，机组齿轮箱模块、发电机模块和液压系统模块等都采用了标准通用联接，可在同系列机组中自由切换，供应链资源可在内部灵活调配。同时，基于半直驱技术路线，明阳智能现已培育起独特的供应链体系，且关键部件的供应链体系与行业不存在竞争。由于半直驱永磁式海上风电机组的优势明显，随着全球海上风电场快速建设的步伐，将有越来越多的大型半直驱永磁式海上风电机组投放我国海上风电市场。



太阳能

(接第 42 页)

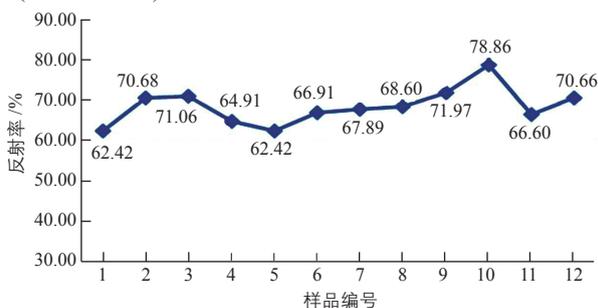


图 7 12 款氟膜在可见光波段 (380~1100 nm) 的反射率情况

## 3 结论

本文通过对 PVDF 膜和 PVF 膜进行测试，得出以下结论：

- 1) 国产 PVDF 膜的质量水平已接近进口 PVF 膜，部分 PVDF 膜的性能优异。
- 2) 随着 PVDF 膜厚度的增加，其性能有较为明显的提高。氟膜厚度依旧是企业在采购过程中关注的重点。

中关注的重点。

### 参考文献

- [1] 裴会川, 冯亚彬, 梁哲. 光伏标准体系趋完善, 质量及可靠性成重点 [EB/OL]. <http://www.kaixian.tv/gd/2014/0627/6635409.html>, 2014-06-27.
- [2] 张晓东, 刘鑫, 冯江涛. 光伏组件背板的湿热老化行为研究 [J]. 太阳能, 2012, (9): 29 - 31.
- [3] 吕瑞瑞, 张增明, 彭丽霞, 等. 一种光伏背板寿命推算的研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2012, 41(1): 20 - 23.
- [4] GB/T 13542.2-2009, 电气绝缘用薄膜 第 2 部分: 试验方法 [S].
- [5] GB/T 36289.2-2018, 晶体硅太阳能电池组件用绝缘薄膜 第 2 部分: 氟塑料薄膜 [S].
- [6] GB/T 23988-2009, 涂料耐磨性测定 落砂法 [S].
- [7] GB/T 19789-2005, 包装材料 塑料薄膜和薄片氧气透过性试验 库仑计检测法 [S].
- [8] ISO 9050-2003, Glass in building—Determination of light transmittance, solar direct transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors[S]. 太阳能