

海上风电是未来新能源发展的重要方向

——专访海上风力发电装备与风能高效利用全国重点实验室主任黄守道

■ 本报记者 彭慧

黄守道,享受国务院特殊津贴专家,中国电工技术学会会士、国家重点研发计划项目首席科学家,现任海上风力发电装备与风能高效利用全国重点实验室主任、湖南大学二级教授、“岳麓学者领军岗位”特聘教授。他长期聚焦风电领域技术与装备的研究以及人才培养,针对国家重大战略需求,在大型永磁风力发电等方面做出了开拓性工作,研究成果广泛应用于风能资源开发等领域,产生显著经济社会效益。

能源是经济社会发展的基础和动力,对国家繁荣发展、人民生活改善和社会长治久安至关重要。党的十八大以来,面对错综复杂的国际国内形势,以习近平同志为核心的党中央提出“四个革命、一个合作”能源安全新战略和“能源强国”新目标,为新时代我国能源高质量发展指明了方向。2022年6月1日,国家发展改革委、国家能源局等9部门联合印发《“十四五”可再生能源发展规划》(以下简称“规划”)。《规划》指出:以京津冀及周边地区、长三角、粤港澳大湾区等为重点,加快发展分布式新能源、沿海核电、海上风电等。除此之外,同年10月,国家能源局颁布的《能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划》中提出,加快完善风电、光伏等可再生能源标准。

黄守道教授在接受本报记者采访时表示,抓紧完善沙漠、戈壁、荒漠地区大型风电光伏基地建设有关技术标准,加快制定海上风电开发及多种能源综合利用技术标准。在新能源发展的大趋势下,我国提出了一系列风力发电的发展战略与政策,海上风电作为风电领域的重要一环,发展潜力巨大。

记者:目前我国新能源发展呈现什么趋势?

黄守道:目前我国新能源发展迅猛,风电、太阳能发电等装机容量大幅提升。根据国际可再生能源机构发布的《可再生能源装机容量统计2023》,截至2022年底,全国可再生能源总装机占比为全国装机的45.3%。在我国清洁能源结构装机占比中,水电占比34.04%、太阳能发电占比32.39%、风电占比30.09%。截至2022年12月底,全国风电装机容量约3.7亿千瓦,同比增长11.2%。2022年,风电发电量7626.7亿千瓦时,占全国发电量8.6%,已经成长为我国第一大新能源电源。

如今,我国正在向“双碳”目标不断奋斗,海上风电也作为一种潜力清洁能源,迸发出前所未有的活力,海上风电会是未来新能源发展的主要方向之一。在1991年至2001年期间,海上风电建设尚处于规模和单机容量较小,在2002年至2011年期间,海上风电建设规模逐渐增大,开始进入大功率时代。2010年我国也建设了第一个大型海上风电场——上海东海大桥海上风电场。再到2012年至今,各国海上风电,如中国广东潮州海域海上风电项目(4330万千瓦)等海上风电都在蓬勃发展。而我国的海上风能资源较好,海上风能储量约2250吉瓦(离海岸线200公里)。据统计2022年我国新增海上风电装机容量6.8吉瓦,占全球新增70%以上,增速远高于世界整体水平。截至2022年底,我国海上风电累计装机量突破30吉瓦,累计装机总量全球第一。随着技术的不断进步和政府的政策支持,我国的海上风电市场正在逐渐扩大,预计2030年我国海上风电累积装机量将达2亿千瓦。

记者:海上风电与陆上风电相比较具有哪些明显的优势?

黄守道:首先与陆地上的风相比,海风通常要更大。离岸10千米的海上的风速比陆上高20%左右,同时海上很少有静风期,风力机的发电时间更长;其次海风一般不会受到地形阻力的影响。陆上的地形高低起伏,对地面的风速有很大的阻碍阻尼作用,因此陆上风机需保证足够的高度,以便利用高空相对较大的风。也正是地形问题,陆上各个高度的风速相差很大,使得风轮上下受力不平衡,导致叶片振动、疲劳乃至断裂,同时传动系统也容易损坏。然而,海上则没有这个问题,因为海平面一般都很平,并且海上风况普遍优于陆上,风阻较小,平均风速高,并且风切变也小于陆上,再加上上海上的风向改变频率也较陆上低,因而海上的风更平稳,更适合风机风轮的运行;再者海上风电具有离用电负荷近、不占陆地不扰民等优势。我国辽阔的大西北建设的大量风电场,都是通过特高压、超高压线路输送到东南沿海的用电负荷中心,距离超过两三千米。而海上风场基本都建设在沿海



●黄守道

一两百公里处,距离负荷中心较近,且常年有风,很适合用电负荷中心的需求。此外海上风电机组单机容量更大,发电效率更高。目前,海上6-8兆瓦机组技术已成熟,10-11兆瓦机组处于试运行阶段,13兆瓦、16兆瓦机组已并网发电,在漂浮式海上风电领域,中国海装、中海油和三峡集团等漂浮式试验样机已陆续下线。对比来说海上风电发电效率比陆上风电高出20%-40%、利用小时数更高,能源利用效益更高。

记者:未来海上风电发展方向具有哪些特征?

黄守道:未来海上风电向大型化、规模化、深远海、多能融合方向发展。

第一,大型化是未来海上风电发展的重要趋势之一。中国新增海上风电机组平均装机容量从2017年开始逐年增长,2021年中国海上风电场主流机型平均单机容量为5.6兆瓦,相比2011年的2.7兆瓦增长近一倍。2021年底海上风电平价之后,根据沿海省份风资源等条件不同,招中标要求8兆瓦及以上偏多,广东等地区要求11兆瓦及以上。在2022年国家重点研发计划项目“20兆瓦级海上新型风力发电实现机理及关键技术”的支持下,湖南大学正在开展20兆瓦新型漂浮式海上风电机组关键技术研究及样机研制。

第二,海上风电开发建设将进一步走向规模化。2010年,上海东海大桥海上风电场,由34台国产3000千瓦风电机组组成,总装机容量为10.2万千瓦;2017年,华能如东海上风电场,总容量70万千瓦;2022年,三峡阳江沙扒海上风电项目,中国首个百万千瓦级风电场。分5期安装269台海上风电机组以及3座海上升压站,总容量170万千瓦。

第三,海上风电资源开发逐渐由近及远,由浅至深。我国已投运风电场平均离岸距离31.31公里。风电场平均离岸距离由2016年14.2公里逐渐增加到33-34公里,水深由30米增加至50米。目前国内离岸距离最远(95公里)、水深最深(30至50米)的汕头中澎2海上风电场项目计划于2024年9月22日建成投产,海上风电项目远海化趋势越来越明显。

第四,开展以海上风能为主体的海洋能源多能融合利用,提升风能综合利用水平。海洋可再生能源的资源储量更丰富、能源密度更高,更适宜进行规模化和集中开发,对沿海经济发展的支撑作用更加显著。2023年8月,中广核汕尾风渔融合项目于广东汕尾开工建设,是我国首个零碳现代化海洋牧场示范项目,国内首个规模最大的具备综合科研实验功能的风渔融合项目,具备单体6万立方米的桁架式养殖网箱。海洋立体空间更加宽阔,且不受地形、地表起伏,以及地面建筑物影响,海洋资源的立体化、多层次特征更明显,更容易进行规划和整体布局,开展以海上风能为主体的海洋能多能融合利用,能提升风能综合利用水平。目前以风能、海洋能、氢能(储能)多能融合能源岛建设,结合了基于液氢冷却的超导风力发电机、深远海漂浮式平台、海水淡化-电解制氢-气氢液化集成系统

等前沿技术的特点和优势,实现海上风电产生的绿色电力制造液氢,产出巨大重大社会、经济效益,为海上风电消纳提供了新思路。东方电气集团与中国工程院谢和平院士团队联合研制的全球首套与可再生能源相结合的漂浮式海上制氢平台“东福一号”已实现海水无淡化原位直接电解制氢。目前在国内外多能融合能源岛都在规划建设中,例如丹麦北海能源岛:在北海距日德兰半岛约50英里的海域一个人工岛正在建设中,这将是世界上第一座能源岛。到2030年至少有3吉瓦的海上风电连接到丹麦和荷兰,长期容量将达到10吉瓦的海上风电;浙江舟山六横:确立了打造“海上能源岛”的产业发展定位,并谋划布局LNG、海上风电、光伏发电、氢能等清洁能源产业,已具备了较好的产业基础和发展前景。

记者:海上风电朝着大型化、规模化、深远海、多能融合发展大背景下会有哪些关键技术装备挑战?

黄守道:大型化、规模化、深远海、多能融合发展大背景要求海上风电装备和控制技术需要具备更强的适应性、可靠性、可持续性和经济性。发展海上风电具体面临以下三大关键技术装备挑战:

挑战一:大功率海上风电装备基础理论薄弱、核心部件对外依存度高。在环境方面,海上风电装备需要面对台风、盐雾、严寒、雷暴等严酷环境,这对装备的设计制造水平要求极高。在设计装备方面,国内海上风电装备仿真设计平台处于起步阶段,主要仿真设计平台(GH Bladed, SIMPACK)均来自国外;主轴承和伺服系统等核心部件依赖进口,高精主轴承、主齿轮箱轴承进口比例达到100%;超大功率海上风电机组主控PLC和变桨伺服驱动器进口比例同样高达100%;复合材料碳纤维原丝、固化剂、风电高精轴承专用润滑脂等进口比例也有90%。此外,海上风电装备验证手段落后,缺少六自由度动态加载试验台、20兆瓦级以上大型海上风电主传动链试验台。目前,亟需提升我国大功率海上风电装备设计理论与制造水平。

挑战二:海上大规模风电场集群控制技术相对落后。海上风电大规模并网依赖风电机组单机系统、风电场内部控制系统及风电场群调度平台的主动控制与支撑,以增强其对电网频率电压波动、故障、振荡等复杂工况的适应性,存在风电“机组级-风场级-场群级”多层次控制技术挑战:大型风电机组电机线圈匝数可达1000多个、变频器功率器件可达100多个,且交叉耦合、故障易扩散,实现机组故障容错运行困难;大规模风电场风机数量点多面广、运行环境复杂恶劣,且有有功无功相互耦合,电网电压跌落或突升通过大规模风电汇流系统传递扩大,极端工况下风电场机群高效协同控制难度大,复杂电网环境下无法兼顾风电场内部的高效控制与稳定运行。目前,亟需提升我国海上大规模风电集群控制技术水平。

挑战三:海上风能综合利用率低。目前受到环境条件、装备性能、单一能源、传输方式、电网消纳、控制手段等多重因素影响,风能捕

获效率不高以及海上风电场长期安全可靠运行问题凸显,尺寸、体积受限制,电磁、机械损耗高,导致海上风能利用率低,从而出现发电效益与投资规模不匹配,增收不增利的问题,制约了海上风电大规模发展和深远海开发。目前,亟需开展以海上风能为主体的潮流能、波浪能、洋流能等多能融合,以及以海洋牧场为代表的海上风电区域融合利用技术研究。

记者:海上风电应该如何面对这三个挑战?

黄守道:面对上述三个方面的挑战,可以围绕大功率海上风电机组基础理论与仿真设计、智能化风电场集群和海上风能高效利用三大技术方向展开研究。

应对大功率海上风电装备基础理论薄弱、核心部件对外依存度高的问题,开展大功率海上风电机组基础理论与仿真设计研究。在基础理论方面,重点对模块化电机、大型海上风电机组系统的高效可靠设计及制造,大型海上风电机组抗震、抗疲劳设计技术,复杂海洋环境下风电机组高效成组工艺关键技术以及复杂大型海上风电机组部件安装工艺工装的机电液一体化设计开展研究。在机组关键材料及核心部件研究方面,重点攻关用于大功率海上风电超长叶片、高精主轴承、齿轮箱等核心部件的高性能材料及其疲劳特性评价理论和测试验证方法,大功率风电机组的主控及核心变桨伺服驱动技术。基于此,构建大型风电机组仿真设计与试验平台,其中包括超大型风电机组性能综合测试平台、六自由度动态加载试验台、半实物仿真的硬件在环测试平台,开发自主的海上风电机组风浪流全耦合动力响应软件平台。聚焦大型海上风电机组的大功率、高可靠性、高效性方面,全面提升我国海上风电核心装备自主研发水平。三峡集团和金风科技联合研制的16兆瓦级海上风电机组已经并网发电,团队也获批2022年度国家重点研发计划项目《20兆瓦级海上新型风力发电实现机理及关键技术》(2022YFB4201500),旨在研制一基双机新型海上漂浮式风电机组。

目前海上大规模风电场集群控制技术相对落后,应重点开展智能化风电场集群关键技术研究。主要包含三个核心技术。第一个是风电集群虚拟现实与数字孪生技术,关键在建立具有全服役周期健康状态演化及预测功能的风电机组数字孪生模型,研究实现机组和机群孪生模型的迁移、系统算力问题解决、计算效率优化、时效性提升、系统准确评价的方法。第二个是风电机群全寿命周期健康预测与智能管理技术,关键在研究风电机组健康损耗累积耦合模型、关键部件健康状态预测方法和风电机群全寿命周期健康智能运维与管理策略。第三个是风电机群服役效能评估与调控等关键技术,关键在研究涵盖功能、性能、可靠性、安全性、环境适应性、适用经济性等的服役质量指标体系、面向维保优化的中长期调控、面向高品质发电的短期调控及风电运维资源调控优化策略。针对风场的集成化、智能化、协调化方面,全面打造我国大规模海上风电集群科技创新战略高地。本团

队已获批2022年度国家重点计划项目《风电机组服役全周期质量评估与动态调控技术研究》(2022YFF0608700),旨在研究风电机群全周期服役质量评估与调控管理技术。

应对海上风能综合利用率低的挑战,重点在于海上风能高效利用的关键技术研究。其中包含三个核心,第一个是新型风能高效能量转换理论与装备,关键是开展新型结构设计 with 气动传动性能优化设计、重心可调的支撑结构轻量化设计、安全稳定的漂浮平台及系泊系统设计及适用于新型机组的高功率密度新型发电机设计。第二个是风能、海洋能、氢能(储能)多融合能源岛的基于液氢冷却的超导风力发电一体化系统关键技术,关键是研制基于液氢冷却的高效高可靠超导风力发电机,突破深远海风电的机组“扩容瓶颈”,同时提升风电机组效率;研究超导风电制氢一体化系统与集成技术,有效解决大规模风能消纳、储存等问题;开发基于液氢冷却的超导风电制氢一体化平台。第三个是多融合能源岛海上多能一体化运行关键技术,关键是分析风浪多源发电出力耦合特性,研究联合出力多时间尺度功率预测技术、面向新能源消纳的多能协调控制与调度技术,为多能一体化系统的落地和经济效益最大化提供有力支撑;研制多能一体化智能监控与能量管理系统,建立远程人机友好型交互界面,实现无人值守。在海上风能利用的高效率、多能融合、经济适用性方面,加快推进“卡脖子”技术攻关,探索更多风能利用的新途径。团队研究基于惯量可调的构网型新能源场站关键技术,以及海上液氢超导风力发电技术。

记者:目前您的团队在风电领域研究成果有哪些?

黄守道:团队近20年来围绕大型直驱永磁风力发电机、多通道模块化海上风力发电机、风电机组高质量服役关键技术等方面开展了持续研究。

“十一五”以来,团队主持或参与国家科技支撑计划项目、国家“863”计划项目、国家国际科技合作专项、国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重点项目等国家级、省部级项目80余项重点专项,其中风电领域的代表性项目有:“十一五”科技支撑计划“直驱式风电机组永磁同步发电机的研制及产业化”、863计划“兆瓦级(2兆瓦)直驱型风电机组及其关键部件的设计和制造技术”、2011年国家国际科技合作专项“基于轻型直流输电的海上风电系统关键技术”、2016年国家重点研发计划“重大复杂机电系统(风力发电)服役质量检测监测及维护质量控制技术研究”、2017年国家自然科学基金重点项目“多相直驱永磁风力发电变流一体化系统关键基础问题研究”、2019年和2022年国家重点研发计划“面向深远海的大功率(10兆瓦及以上)海上风电机组及关键部件设计研发”、“风电机群服役全周期质量评估与调控技术研究”、“20兆瓦级海上新型风力发电实现机理及关键技术”。团队与湘电股份、哈电风能、中车株洲电机、金风科技等产学研协同研制出国际首台5兆瓦在内的系列化直驱永磁风力发电机组等。

团队与湘电股份、哈电风能、中车株洲电机、金风科技、华电电机院等单位合作获国家、省部级科技奖励10余项。特别是“十三五”以来,团队在风电领域获2019年国家技术发明二等奖“大型低速高效直驱永磁风力发电机关键技术及应用”、2018年中国机械工业科学技术一等奖“大型高效直驱永磁风电机组关键技术”与“大型风电机组提升服役性能关键技术及应用”。

2022年由哈电风能、湘电股份、湖南大学作为共同依托单位重组建设“海上风力发电装备与风能高效利用全国重点实验室”,2023年3月获科技部批准。团队作为实验室核心力量,在能源技术革命和实现“双碳”目标的重要历史机遇期,围绕风力发电“海洋化、规模化、数智化”带来的技术变革,致力于风电领域应用基础理论与核心技术研究。聚焦“复杂环境下海上风电全过程能量转换协同机制与风能高效利用”重大科学问题,攻关大功率风力发电装备设计制造、风电场集群拓扑优化与智能控制、风能高效利用等关键技术,形成“研发、设计、制造、试验、评估、调控、标准、管理”一体化的海上风电装备与风能高效利用技术创新体系,实现海上风电技术及装备自主可控,建成我国海上风电技术策源地和高水平人才聚集地,打造风电领域国家战略科技力量。



●全球首台抗台风型漂浮式海上风电机组



●海阳海上风电产业走向“深蓝”



●福清兴化湾二期海上风电场吊装10兆瓦海上风电机组



●江苏大丰:海上风电节能又环保