

# 海上风电如何支撑中国能源转型发展?

面对能源短缺、环境污染、气候变化等人类共同的难题,一场以大力开发利用可再生能源为主题的能源革命在世界范围内兴起。十九大报告中指出,要推进能源生产和消费革命,构建清洁低碳、安全高效的能源体系。2020年9月和12月,习近平主席分别在第七十五届联合国大会和气候雄心峰会上宣布将提高国家自主贡献力度,提出到2030年,非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右,风电、太阳能发电总装机容量将达到1.2×10<sup>9</sup>kW以上;二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取于2060年前实现碳中和。这一系列措施进一步明确了新时代我国能源发展的方向。

我国能源供应和能源需求呈逆向分布,在资源上(包括新能源资源)“西富东贫、北多南少”,在需求上恰恰相反。我国海上风电资源丰富,同时具有运行效率高、输电距离短、就地消纳方便、不占用土地、适宜大规模开发等特点,海上风电将成为我国大力发展可再生能源的必然选择。“十三五”期间,我国海上风电虽然得到快速发展,但是截至2019年年底累计装机只有6.42×10<sup>6</sup>kW,相比海上风电已进入规模化阶段的英国、德国等欧洲国家,我国仍处于商业化发展初期阶段,“十四五”期间面临着诸多挑战。

## 我国能源革命的紧迫性

随着经济社会的高速发展,我国经济总量已跃居世界前列。与之相应的能源消耗总量也持续大幅增长,目前已成为世界上最大的能源生产国和消费国。2019年我国能源生产总量达到3.97×10<sup>9</sup> tce,发电量达到7.14×10<sup>12</sup> kW·h,包括可再生能源发电装机在内的指标均达到世界首位。2019年我国一次能源消费总量达到4.86×10<sup>9</sup> tce,其中煤炭占比为57.7%,石油占比为18.9%,天然气占比为8.1%,非化石能源占比为15.3%。在我国能源电力事业取得举世瞩目成就的同时,能源资源约束日益加剧,生态环境问题突出,调整结构、提高能效和保障能源安全的压力进一步加大,能源发展面临一系列严峻挑战。

(一)能源消费总量持续增加,能源利用效率较低

21世纪初以来,我国一次能源消费总量持续增长,年均增长近2×10<sup>8</sup> tce,有力支撑了我国经济社会的快速发展。我国单位国内生产总值(GDP)能耗从1978年的15.66 t/万元下降到2019年的0.49 t/万元,但仍高于世界平均水平50%左右。多年来,我国GDP增长过多依靠投资和出口拉动,高能耗产业发展过快。我国能源转化和利用效率偏低,先进高效能源技术普及率仍然较低,煤炭等化石能源清洁高效利用技术发展不平衡,部分行业开发应用滞后,能源优质化利用程度不高,与发达国家差距明显,节能潜力巨大。

## (二)用能结构不够绿色,碳减排压力大

我国“富煤、贫油、少气”的能源资源禀赋,使煤炭一直在我国一次能源生产和消费结构中占据主导地位。2019年我国煤炭占一次能源消费比重约为57.7%,非化石能源近年来有所增长,占比为15.3%,与世界平均水平(15.7%)相当。2019年全球能源相关CO<sub>2</sub>排放总量为3.42×10<sup>10</sup> t,我国CO<sub>2</sub>排放量位于全球第一,排放量为9.8×10<sup>9</sup> t,是美国的2倍,欧盟的3倍。2020年12月,习近平主席在气候雄心峰会上宣布到2030年,中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降65%以上。在全球二氧化碳排放量止增的同时,我国排放量仍在继续上升,为实现这一目标,未来温室气体减排压力巨大。

(三)油气对外依存度持续增高,能源安全形势严峻

我国化石能源的储采比非常低,远远低于世界平均水平。2019年我国石油、天然气、煤炭的储采比分别为18.7年、47.3年和37年,世界石油、天然气、煤炭平均储采比为49.9年、49.8年和132年,石油仅为世界平均水平的约1/3,煤炭仅为世界平均水平的约1/4。2017年我国超过美国成为全球第一大石油进口国,2019年原油消费量达到6.4×10<sup>8</sup> t,产量为1.9×10<sup>8</sup> t,进口量为5.1×10<sup>8</sup> t,对外依存度达71%。自2018年起我国成为最大天然气进口国,2019年天然气消费量为3.001×10<sup>11</sup> m<sup>3</sup>,产量为1.762×10<sup>11</sup> m<sup>3</sup>,进口量为1.391×10<sup>11</sup> m<sup>3</sup>,对外依存度达到43%。随着全球地缘政治变化、国际能源需

求增加和资源市场争夺加剧,我国能源安全形势严峻。

(四)产能过剩,同质化严重,技术创新能力不强

当前能源及其相关领域,特别是煤炭、钢铁和煤电行业的投资过剩、产能过剩现象较为普遍。科技是推进经济发展和社会进步的根本动力,也是一个国家核心竞争力的重要标志。新能源产业属于战略性新兴产业和技术密集型产业,尚有大型轴承和齿轮箱、控制系统等部分核心设备和工具软件还严重依赖进口,需要攻克其中的“卡脖子”关键技术。高比例新能源并网系统受到新能源波动性、间歇性和不确定性等的影响,供电可靠性不高,且容易受极端天气等影响,亟需从电力系统基础理论、规划方法、调度运行技术等角度研发解决高比例新能源接入电网造成安全运行与可靠供电等问题。此外,在新能源领域,国家和行业标准尚不完善,技术研发缺乏大型测试平台。

海上风电在能源转型发展中的地位和前景

(一)海上风电将成为我国大力发展可再生能源的必然选择

## 1. 海上风能资源丰富,风电效率高

我国拥有超过1.8×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>的大陆海岸线,可利用海域面积超过3×10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>,5~50 m水深、70 m高度的海上风电可开发资源量约为5×10<sup>8</sup> kW;考虑到70 m以上的技术开发能力,实际可开发资源量更多。海上风速高,风机单机容量大,年运行小时数最高可达4000 h以上,海上风电效率较陆上风电年发电量多出20%~40%,具有更高的能源效益;海上风电场远离陆地,不受城市规划影响,也不必担心噪音、电磁波等对居民的影响。

## 2. 海上风电靠近东部负荷中心,就地消纳方便

我国绝大部分陆地风能、太阳能资源分布在西北部,北部和西北部煤炭资源占全国的76%,西南部水能资源占全国的80%,而中东部负荷需求则占全国的70%以上。能源基地大多远离负荷中心,最大距离达到3000 km。中国工程院《我国未来电网格局研究(2020年)咨询意见》指出,随着我国西部产业发展和东部清洁能源的开发,东部和西部负荷不平衡程度将降低,“西电东送”规模会出现拐点,“西电东送”也面临着不可持续问题。中国工程院咨询研究团队预测,2030年我国中东部地区最大用电负荷将达到9.7×10<sup>8</sup> kW,需受入电力超过3.6×10<sup>8</sup> kW,必须采取“集中开发、远距离输送”与“分布式开发、就地消纳”并举模式。紧邻东部负荷中心的海上风电大规模开发,能够减轻“西电东送”通道建设压力;海上风电与“西电东送”的水电还能在出力上形成季节互补。发展海上风电能够进一步提高可再生能源占比,加快能源结构转型。

## 3. 带动沿海地区经济发展,形成海洋经济新的增长极

根据各省规划,到2035年,我国海上风电装机将达到1.3×10<sup>8</sup> kW左右,与我国目前西电东送容量相当,对促进我国能源结构转型和构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系,将发挥举足轻重的作用。海上风电综合优势明显,东部地区可以把发展重心转移到海上风电资源的开发,海上风电将支撑我国能源结构转型和海洋经济发展。未来中东部电力负荷也将形成以本地传统电源、“西电东送”、就地分布式新能源和规模化海上风电四点支撑的局面,结构见图1。

## (二)国内外海上风电发展现状及趋势

### 1. 国内外海上风电的发展现状

根据全球风能理事会(GWEC)统计数据,2019年全球海上风电新增装机6.1×10<sup>6</sup> kW,累计装机容量达到2.914×10<sup>7</sup> kW,比2018年增长了35.5%。2015年~2019年,全球海上风电市场年均增长近16%。

2019年我国海上风电新增装机1.98×10<sup>6</sup> kW,累计装机6.42×10<sup>6</sup> kW,提前1年完成了“十三五”末装机5×10<sup>6</sup> kW的规划目标,仅次于英国和德国,位居全球第三。截至2019年年底,在建项目装机1.095×10<sup>7</sup> kW,已核准待建项目4.048×10<sup>7</sup> kW。按照各省规划,江苏、广东等是未来海上风电发展的重点区域,我国海上风电也将进入高速发展时期。

### 2. 国内外海上风电的发展趋势

近些年欧美发达国家在大规模海上风

电集中开发的技术集成与关键装备领域进步巨大,海上风电总体呈现“由小及大、由近及远、由浅入深”的发展趋势,即单机额定容量逐步增大,海上风电机组进入10 MW时代;风电场规模越来越大,单体规模超过百万千瓦,规模化开发趋势明显;风场离岸距离和水深不断增加,分别超过100 km和100 m,深远海化趋势明显;竞价上网成为海上风电发展最新模式,海上风电成本逐步下降。

## 海上风电重点技术

### (一)风电机组技术

目前海上风电机组向着“大容量、轻量化、高可靠”趋势发展。国外最大单机容量达到12 MW,国内最大单机容量为10 MW。

#### 1. 超长超柔叶片技术

叶片是影响风机性能和成本的关键部件,是衡量国家技术实力的标志之一,通过弯扭耦合控制实现叶片的自适应卸载,降低叶片单位长度的成本。通过合理的材料布置方案提高叶片面内的气动阻尼,提高叶片可靠性。柔性叶片配合气动附件的设计方案可以减少叶片的失速风险,保证机组的发电量。柔性叶片的弯扭耦合,柔性叶片与变桨系统耦合的稳定性,叶片变形动态测试等方面仍受制于国外的技术。

#### 2. 风电机组主轴轴承技术

风电机组主轴轴承式风机的核心枢纽,不但要具有防腐防潮等性能,还必须承载整个风机巨大震动冲击。目前国内在主轴轴承设计布局等方面依然存在薄弱环节,一定程度上依靠国外引进技术,还需进一步深入研究整个轴系,设计适合我国沿海风情的轴承技术。

#### 3. 直驱永磁风力发电机

目前国内海上风力发电机类型主要有双馈风机和永磁直驱风机两种。它们的主要区别在于发电结构不同,传动不同。永磁直驱风机相对双馈风机效率更高、能耗较小、受风速等条件限制小,对于我国风电行业发展具有更重要的意义。但因永磁直驱风机制造成本较高,控制难度较大,技术还不成熟等问题,国内未来一段时间永磁直驱风机和双馈风机仍将并行发展。

#### 4. 新型高效风能转换装置

在单风轮C<sub>pm</sub>(风能利用系数最大值)达到0.48的情况下,流过风轮后的风速仅降低20%左右,且主要通过风轮外叶展吸能量,内叶展能量利用率很低,具有很高的能量梯级利用价值。串列式双风轮机组结构紧凑,单位面积功率密度更高,单位面积内机位更多,总容量更大。双风轮风机功率密度高、占地少,能够有效提高能源利用率,具有较高风能利用系数。浙江某300 MW海上风电场,风场面积47.5 km<sup>2</sup>,装有58台5.2 MW机组,如采用等功率双风轮机组,可增加20%~30%机位。

### (二)海上输电技术

#### 1. 海上风电单场送出技术

目前海上风电单场送出的技术主要有高压交流输电(HVAC)、常规直流输电(LCC-HVDC)、柔性直流输电(VSC-HVDC)、分频输电(FFTS)四种方式,海上风电场输电方式选择主要参考风电场容量和离岸距离。海上风电场开发规模的扩大,输电容量和输电距离的增加,机组大型化、受端电网短路电流水平、电网安全稳定等因素,使得海上风电输电直流化方向的发展趋势愈加明显。

#### 2. 大规模海上风电集群组网送出技术

未来可用于大规模海上风电集群组网送出的方案主要有基于HVAC技术的场间交流并联组网交流送出,基于VSC-HVDC的交流并联组网柔直送出,基于VSC-HVDC的多端柔性直流输电和基于LCCHVDC和VSC-HVDC的混合直流输电。

### (三)海洋工程技术

海洋工程技术主要包括勘查工程技术、结构工程技术、岩土工程技术、建造技术以及运营维护技术五部分。水深超过50 m的深海区域,如采用固定式基础结构,造价将大幅增加,且目前技术难以实现,深海浮式风电场将成为海上风电场发展的新趋势。2018年江苏亨通光电股份有限公司成功中标葡萄牙海上浮式风力发电输出系统建设项目,为我国漂浮海上风电项目开发积累了成功经验。

### (四)运维技术

#### 1. 激光雷达检测技术与风速实时预测

通过装设于漂浮式平台的激光测风雷达进行风资源观测,可为设计规划以及优化调度提供高精度风况指导;通过机舱式激光雷达实现前馈变桨降载运行。

#### 2. 风电场尾流控制

构建面向控制的稳态尾流模型,量化机组间因尾流效应产生的功率耦合关系;通过优化问题的构建求解,降低尾流效应引起的功率损失,提高全场发电量。结合模态分解与频域分析手段,分析尾流的动态特性,量化尾流效应对机组载荷的影响,实现功率-载荷协同优化。

#### 3. 风电场优化调度与控制

综合风-浪-流-机的复杂耦合影响,从固有/可变两个角度表征高可靠性前提下的机组功率调节特性,量化功率调节与机械载荷指标间的关系。构建群-场-机多层框架的风电场群协同优化调度方法,提高规模化海上风电的并网友好性。

#### 4. 设备智能检测与维修

基于智能数字化检测技术构建风电场大数据云平台,实时更新与计算风场监控状态、故障分析、设备监测及预警等,以定期维护与故障预警维修相结合的形式,保障机组常规维护,及早发现故障并及时处理,减少故障导致的停机时间,海上风电场运维流程如图9所示。建设区域化运维基地及智能调度策略,结合设备健康度检测信息与精细化气象预报,优化部署海上维修交通工具及检修团队,提高维修效率,降低运维成本。

#### 海上风电高质量发展的对策建议

(一)加大海上风电资源勘察力度,建立资源评估体系

建议政府部门和科研机构,对全国海上风电资源进行详尽的勘测,建立资源评估体系,强力支撑国家能源战略规划、政策法规编制,引导和优化可再生能源项目投资布局。建议在相关教育专业设置和可再生能源资源勘察评估专业人才培养等方面予以重点支持。

(二)提高海上风电对我国能源转型发展的认识

革新我国能源资源禀赋理念,规范能源资源禀赋的内涵,旗帜鲜明地将海上风电等可再生能源作为国家能源规划和战略政策中不可或缺的组成部分;国内近海海上风电资源丰富,开发利用潜力巨大,且靠近东部电力负荷中心,就近消纳方便,发展海上风电将成为我国能源结构转型的重要战略支撑,为海洋综合开发利用与建设海洋强国贡献力量。

(三)加大国家层面的宏观统筹与整体规划

“十四五”期间强化对海上风电的顶层设计,统筹未来电网建设格局,支持东部沿海加快形成海上风电统一规划、集中连片、规模化滚动开发态势,优化电力生产和输送通道布局;聚焦“新基建”,加快广东、江苏等风能资源良好省份现有的海上风电基地建设,并逐步推动海上风电往深海、远海方向发展,实现海上组网与就地消纳;建议电网企业一同加入海上风电开发,统筹考虑电网格局、电力流和电网安全的影响,统一规划建设海上电力输送通道,减少不必要的重复投资。

(四)聚焦“卡脖子”问题,加强科技创新

海上风电技术和装备要求高、科技内容丰富,利用“十四五”窗口期,建议科学技术部、发展和改革委员会、能源局聚焦海上风电全产业链“卡脖子”问题,加大科技攻关力度,提高装备国产化率,推动关键核心技术实现国产化突破;开展全生命周期多维度技术经济评价,建立引导海上风电科技创新的差异化政策扶持机制;在科研体制方面,探索面向国家需求的新型创新合作机制、激励机制、人才培养机制。

(五)健全政策扶持机制,引导海上风电产业健康发展

改变一刀切、限定时限予以补偿的机制,建立针对海上风电的阶段性退坡补贴机制,避免海上风电片面追求规模、忽视质量的“抢装潮”;调动地方财政补贴积极性,通过补贴实现海上风电产业链延伸和推动地方经济转型升级的良性循环;准确把握“放管服”政策尺度,避免陆上风电“4.95万千瓦现象”;开展全生命周期多维度技术经济评价,建立引导海上风电科技创新的差异化政策扶持机制。