

# 海上风电产业融合发展初步探讨

张盼盼 张玉海 朱韶华  
山东电力工程咨询院有限公司  
DOI:10.12238/hwr.v8i5.5385

**[摘要]** 随着化石能源消耗日益增长以及“双碳”目标的实施,低碳减排压力不断增加,海洋可再生能源开发逐渐引起关注,海上能源的融合发展成为当前研究新热点。本文分析了当前主流海洋能——潮汐能、潮流能、波浪能、海流能、温差能以及盐差能发电发展情况,介绍了海上风电近年发展历程,并对海上风电与海洋能融合发电形式进行了探讨。正在迅速发展的海洋可再生能源发电技术,一方面可以减少海上风电发电成本,降本增效,另一方面可以提高单位海域发电效率,缓解能源紧张的现状,更可以有效实现低碳减排和环境保护。

**[关键词]** 融合发展; 海洋能; 海上风电; 低碳减排。

**中图分类号:** TM925.11 **文献标识码:** A

## Research on Industrial integration and development of Offshore Wind Farm

Panpan Zhang Yuhai Zhang Shaohua Zhu

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corp.,Ltd

**[Abstract]** With the increasing consumption of fossil fuels and the implementation of the "dual carbon" goal, the pressure of low-carbon emission reduction is constantly increasing. The development of marine renewable energy has gradually attracted attention, and the integration of offshore energy has become a new research hotspot. This article analyzes the current development of mainstream ocean energy, tidal energy, tidal energy, wave energy, ocean current energy, temperature difference energy, and salt difference energy for power generation. It introduces the recent development history of offshore wind power and explores the integration of offshore wind power and ocean energy for power generation. The rapidly developing marine renewable energy generation technology can reduce the cost and efficiency of offshore wind power generation, improve the efficiency of power generation per unit of sea area, alleviate the current energy shortage, and effectively achieve low-carbon emission reduction and environmental protection.

**[Key words]** Integrated development; Ocean energy; Offshore wind power; Low carbon emissions reduction.

## 引言

自“双碳”目标实施以来,我国加快了海洋可再生能源的开发利用进程。大力发展海洋能源不仅将带来生态环境的改善,还具有巨大的经济潜力。最新出台的《“十四五”可再生能源发展规划》从多个维度统筹规划发展进程,特别强调了稳妥推进海洋能源示范化开发的重要性。规划始终坚持技术创新发展战略,强调“引进来”和“走出去”相结合,以推动海洋能开发,并争取在该领域取得突破性进展,走在世界前列。

海上风电在海洋能源中发展势头迅猛,成为主流发展方向。与陆上风电相比,海上风电具有诸多优势,包括资源丰富、发电效率高、不占用土地、不消耗水资源,并且适合大规模开发。截至2023年9月,我国海上风电的累计装机容量已达3189万千瓦,展现了其迅速增长的态势。

随着各类海洋能源技术的发展,海上风电对能源利用效率提供了更高要求。与此同时,潮流能、波浪能等海洋能受条件限制,大多离岸距离较远,送出成本较高,接入系统困难。有必要对其他类型海洋能与海上风电的融合方式进行探讨,提高发电效率,降低施工成本,对开发利用海洋资源进行尝试与探索。本文重点介绍潮流能、波浪能等海洋能与海上风电的融合发展技术的初步设想,对有效开发利用海洋资源是一种尝试和探索。

## 1 海洋能发展现状

海洋能源指的是依托于海水资源的可再生自然能源,包括潮汐能、波浪能、海流能、温差能、盐差能等。更广义的海洋能概念还包括利用海洋空间中存在的海上风能、海上太阳能、海底地热能等能源形式。

1.1 潮汐能。潮汐能是在太阳与月亮引力作用下而产生的海

水的垂直升降运动,属于势能。韩国仁川港南部的潮汐发电厂,该电厂充分利用黄海东部京畿湾潮汐能,同时给出了一个结合实时潮汐特性的二维有限元模拟模型,可以预测未来潮汐电厂出力。

1.2潮流能。潮流能也是在日月引力作用下产生的海水水平流动,但属于动能。潮流能初步起步在意大利,阿基米德桥公司于1996年就开启了潮流能发电装置的研发,其在2015年于加拿大芬迪湾安装1MW样机,流速可达4.2m/s。

国内潮流能研发起步较晚,但仍有较大突破。浙江大学于浙江舟山海运投运650kW机组。东北师范大学也在浙江舟山海域进行300kW机组海试;哈尔滨工程大学开发600kW样机进行海试。

1.3波浪能。波浪能是海洋表层海水在风力作用下产生的波动中所储存的能量。振荡水柱式波浪能发电装置主要依靠空气压缩带动汽轮机组实现发电功能,是一种较为主流的波浪能发电装置。在远海,漂浮锚固型OWC成为主流设计形式。在国内,中国广州能源所在20世纪90年代的时候建造了中国第一座振荡水柱式波浪发电站。1991年后,广州能源所在此装置基础上进行改造,提高了该装置的发电功率到20kW,并成功完成了发电测试实验。

振荡浮子式波浪能发电装置利用捕能机构在波浪作用下的运动将波浪能转换为机械能。美国开发的Power Buoy波浪能捕获装置已在俄勒冈州投入使用,其装机容量为1.5MW。在国内,广州能源所于2011年研制了名为“哪吒一号”的波浪能发电装置,并在珠海万山岛海域进行了发电测试。

1.4海流能。海流能是海洋中因海水温度、盐度差异或风力作用等引起的定向流动中所蕴含的动能。英国在斯托尔海峡进行了300千瓦的海流能发电装置测试,标志着海流能装置发电的开端。

在国内,主要由各大高校进行海流能发电装置的研发工作,多数项目目前处于样机阶段。杭州林东新能源科技股份有限公司在岱山县秀山岛海域以及舟山附近海域投产了海流能发电装置。

1.5温差能。温差能是指在低纬度海域,由于深层海水与表层海水吸收太阳能的不同以及大洋环流的热量输送等原因而形成的深、表层水温差所蕴含的热能。法国物理学家达尔松瓦尔于1881年首次提出了海水温差能发电的概念,他的学生乔治于1929年制作了第一台温差能发电装置,证明了这一概念的可行性。

国内也在积极开展温差能发电的研究工作。2023年,中国地质调查局广州海洋地质调查局领导的团队研发了一台20千瓦海洋漂浮式温差能发电装置,并在南海海域成功进行了海试。

1.6盐差能。盐差能是江河入海口由于淡水与海水盐度差所储存的物理化学能。在河流入海口,来自陆地的淡水与来自海洋的盐水混合,是发展盐差能的理想位置。20世纪70年代对全球盐差能资源量化的首次估计,全球理论盐差能开发潜力为1.4TW,最新的研究将理论盐差能开发潜力量化为3.13TW。

综上所述,受资源条件所限,海洋能发电理想位置离岸较远,单独送出成本较高。开展海上风电与海洋能融合发电研究,可以提高单位海域面积下的海洋能开发利用强度,缓解海上风电独立开发成本压力,提高发电效率,降本增效。

## 2 海上风电发展现状

随着全球能源安全、气候变化等问题的加剧,世界各国越来越重视促进能源转型发展。作为世界上最大的能源消费国,中国积极采取多项政策措施,促进能源生产和能源革命,支持和利用风能、光伏等新能源,以实现双碳(2030年前二氧化碳排放达到峰值,2060年前碳中和)目标,实施双控(限制能源和资源消费数量和强度)。因此开发海上风电将成为解决未来能源结构和供应模式之间根本相互作用的重要手段。

作为一种清洁、绿色的能源,海上风电在开发过程中不产生污染物或二氧化碳,有助于能源平衡,因此具有巨大的环保价值。此外,海上风电还有许多独特的优势。一方面,开发不受土地空间的约束,与陆上风电相比,消除了土地成本,有利于安装大容量发电机。另一方面,由于海上风向相对稳定,而风的湍流强度较小,通过减少风力涡轮机的负载影响,海上风电的设备使用寿命相对较长。

中国拥有丰富的海上风能资源,海上风电可利用海域面积为 $3 \times 10^6$ 平方公里,开发能力达到758GW,约为陆上风电资源的3倍。到2030年,中国东部地区的最大电力负荷将达到970吉瓦。因此,在东部沿海地区建立海上风电场,可以有效缓解我国西电东送工程的建设压力。

但是,我国海上风电发展仍存在一些问題。国内深远海海上风电技术研究还处于起步阶段,这在很大程度上是政策性的。浮动风电场的海洋规划、建设和维护需要进一步探索。

随着海上风电场选址不断向深远海推进,送出成本逐渐增加,开展海上风电产业融合有利于提高资源利用率,提高发电效率,减少发电成本,是解决海上能源利用的高效途径。

## 3 海洋能与海上风电融合探讨

从陆地到海洋,从近海到远海,从单一发电装置到风浪联合发电装置,世界各国对海洋能源的开发利用正在有条不紊的进行着。目前,海上风力发电技术已经相对成熟,相比之下,海洋能源很难以一种高效、有益的方式进行转换,因此,海洋能发电装置的发电成本仍然很高。为了降低能源利用成本,考虑将海洋能发电装置与其他能量转换装置如海上风力发电机组装在一起,使其共享发电设施以及支撑系统,降低发电成本的同时提高能源利用率。

国内外开展了许多相关研究。苏格兰GOE公司研制的Wave Treader波浪能和风能综合发电装置,但两方面独立运行发电,经同一海底电缆输至岸上电网。中国大管岛2003年建成了多能互补独立海岛示范电站,充分利用波浪能、风能、太阳能三种能源,通过电力电子技术实现能量聚集。厦门中汇明海上发电研究院设计了一种海上综合能源发电平台,综合利用海上风能、波浪能和海流能,波浪能装置利用传动索通过超越离合器将能量传

递到平台水平轴上,阻力型垂直轴风力机以及水下垂直轴叶轮捕获风能和潮流能,在水平轴上进行能量的汇合,最终一起驱动发电机。

大连理工大学在2017年提出一种主要由张力腿平台、NREL 5MW风机和垂荡式波浪能装置组合而成的浮式风浪联合发电装置,如图1所示,波浪能发电装置通过特定滑轮与风机塔架进行连接,利用垂向方向的运动来吸收周围海域的波浪能,吸收的波浪能通过液压传动系统进行能量转换,最终转换成电能。该装置适用于深海海域,张力腿平台的应用可使发电装置的运动得到有效控制,让系统更加稳定。此外,学者们还提出将半潜式浮式风机和振荡浮子式波浪能发电装置集成设计,如图2所示,将振荡浮子设置在浮式基础三个浮筒中间,PTO系统设置在浮子顶端和横撑杆的中心连接处,利用三根立柱间波面升高产生的聚波效应,带动振荡浮子垂向运动,促进装置发电,结构的大部分机械发电结构位于波面以上,在安装和后续维护时不受海水腐蚀。

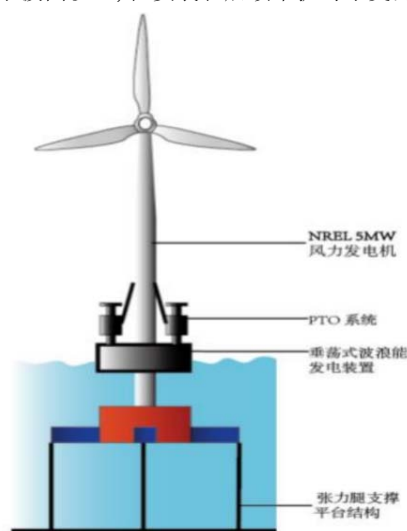


图1 浮式张力腿平台风浪联合发电装置

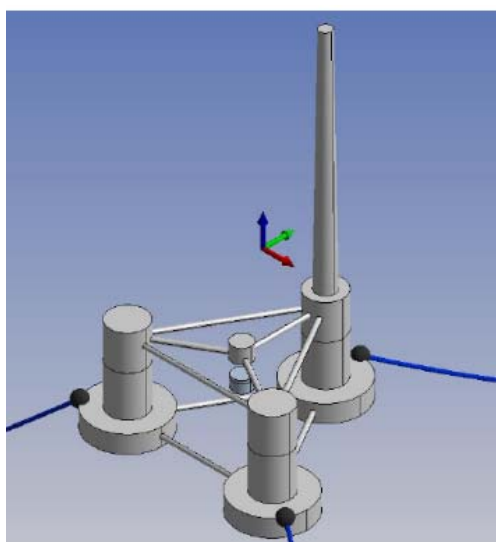


图2 浮式半潜平台风浪联合发电装置

苏格兰斯特拉斯克莱德大学对一种新的海上浮动可再生能源系统进行了水-气系泊耦合动力学分析,该系统集成了海上漂浮式风机(OFWT)、波浪能转换器(WEC)和潮汐涡轮机,通过三种类型的可再生能源系统的组合来提高电力生产并减少平台运动。组合概念实现了漂浮式风力涡轮机、波浪能转换器和潮汐涡轮机之间的协同作用。与单个浮动式风力涡轮机相比,组合式概念减少了喘振和俯仰运动,总发电量增加了约22%-45%。此外,由于平台运动减少,风力发电机的发电更加稳定。

南非约翰内斯堡大学提出了盐差能与海上风电综合发电概念,其所模拟的减压渗透(PRO)与反渗透(RO)技术的集成增强了盐水管理。盐水被反馈到PRO装置中,以产生盐度梯度,通过膜进行水传输,并产生盐度梯度能量。这是一种清洁、可再生的无碳排放能源,可降低电网碳排放的成本和影响。

#### 4 总结与展望

海洋是地球表面广阔的一部分,占据了71%的面积,蕴藏着巨大且可再生的能量资源。海洋能的开发利用被视为解决未来人类能源需求的有效途径之一,代表了未来能源发展的方向。

目前,海上风电仍然是海洋能发电领域的热点。随着海上风电逐渐向深远海域发展,电能输送成本逐渐增加,急需降低成本提高效率。相当数量的海洋可再生能源发电装置已经进入或接近商业化阶段,未来有望成为促进碳中和的重要手段。然而,海洋能目前仍处于商业化的早期阶段,发电成本相对较高。未来,有望通过技术进步和产业环境改善降低成本,推动海洋能发电的普及应用。

海洋能资源的清洁、丰富以及零碳排放特性将对当前严峻的能源和环境挑战产生显著影响。随着技术的不断发展和成本的降低,海洋能发电将在未来成为更为普及和重要的能源形式。

#### 【参考文献】

- [1]夏登文,康健.海洋能开发利用词典[M].北京:海洋出版社,2014.
- [2]IRENA.Oceanenergy:technologyreadiness,patents,deploymentstatusandoutlook[R].AbuDhabi:IRENA,2014.
- [3]European Ocean Energy Association. Oceans of energy European Ocean Energy Roadmap 2010-2050 [R]. Belgium: E0EA, 2012.
- [4]Liu J, Ma L, Wang Q, Fang F, Zhu Y. Offshore wind power supports China's energy transition. Strategic Study of CAE 2021;23(01):149-59.
- [5]顾煜炯.海上综合能源发电系统:中国,201110257652.X [P].2011-10-15.
- [6]张熙霖,武鑫,吴志民,等.风力/光伏/波浪能混合发电系统的应用研究[J].可再生能源,2004,(02):42-44.

#### 作者简介:

张盼盼(1985--),女,汉族,山东省章丘区人,大学本科,研究方向:新能源发电行业电气设计。