

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.007

# 适合与风力发电结合的波浪能及海流能 共同发电型式探讨

张毅强

(福建大唐国际新能源有限公司, 厦门 3610008)

**摘要:** [目的]为了研究波浪能发电、海流能发电与海上风力发电结合的可能性和可行性, [方法]通过分析波浪能及海流能发电的设备型式和技术水平, 提出三者共同发电的结合方式; 通过分析福建省海上风能、波浪能和海洋能的自然条件, 结合海上风电项目所处的独特地理位置, [结果]梳理出适合与波浪能、海流能发电结合的海上风电项目, 并提出下一阶段工作需要关注的问题。[结论]提出综合开发海洋能源、提高用海效率的一种新思路, 成为今后综合开发海上能源的新的研究方向。

**关键词:** 海上风电; 波浪发电; 海流发电; 立体式

中图分类号: TM614; TM315

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)02-0060-05

## Research on Common Generation Type of Wave Energy and Ocean Current Energy in Conjunction with Wind Power Generation

ZHANG Yiqiang

(Fujian Datang International New Energy Co., Ltd, Xiamen 361008, China)

**Abstract:** [Introduction] In order to research the possibility and feasibility of the combination of wave energy generation, ocean current energy generation and offshore wind power generation, [Method] the paper presented the combination of three common power generation by analyzing wave energy and the equipment type and technology level of current energy generation. By analyzing the natural conditions of wind energy, wave energy and ocean current energy in Fujian province, combined with the unique geographical location of offshore wind power project. [Result] This paper combed out offshore wind power project which is easy to combine with wave energy and ocean current energy generation, and put forward some problems needed attention in the next stage. [Conclusion] This paper puts forward a new way to develop marine energy and improve the efficiency of sea-use, which becomes a new research direction for the development of marine energy in the future.

**Key words:** offshore wind power generation; wave energy generation; ocean current energy generation; 3D combination

福建全省海域面积 13.6 万 km<sup>2</sup>, 海岸线总长 6 128 km。受季风影响以及台湾海峡的峡管效应影响, 海洋能源十分丰富, 全省近海风能理论蕴藏量为: 理论水深 5~20 m 海域有 21.4 GW, 理论水深 20~50 m 海域有 95.3 GW<sup>[1]</sup>, 属全国海上风能最丰富区域之一; 近海波浪能资源蕴藏量约 2.2 MW, 在我国沿海海域仅次于中国台湾和广东省; 沿海部分湾区海洋潮流能较丰富, 资源蕴藏量 1.5~2.0

MW, 具有一定开发潜力。结合福建省部分海上风电项目所处的独特地理位置, 利用风机基础及其配套电力设施, 探索以风力发电为主结合波浪发电以及海流发电共同发电型式, 形成海平面上、海平面、海平面下的多层次立体开发海洋能源, 大幅度提高综合用海效率。

### 1 福建海上风能、波浪能和海洋能状况

#### 1.1 福建海上风能状况

福建沿海总体上受季风气候影响, 其年平均风速较大, 秋冬季以东北风为主, 风向稳定, 风资源

较丰富。按 70 m 高度计, 闽东沿海近海海域年平均风速约 6.5~8.0 m/s, 由北往南风速逐步加大, 风功能密度在 400~600 W/m<sup>2</sup>; 受台湾海峡“狭管效应”的影响, 从闽江口以南到厦门湾以北海域风能最优, 年平均风速基本大于 8.5 m/s, 风功能密度 600~700 W/m<sup>2</sup>; 厦门湾到漳州沿海海域年平均风速约 7.0~8.0 m/s, 功能密度为 450~600 W/m<sup>2</sup>, 由北往南逐步减少。2017 年福建省海上风电规划总规模 13.3 GW, 包括福州、漳州、莆田、宁德和平潭所辖海域 17 个海上风电场。2017 年 3 月 2 日国家能源局《关于福建省海上风电规划的复函》(国能新能[2017]107 号)批复同意了该规划。

## 1.2 福建波浪能状况

海洋波浪能是一种取之不尽、用之不竭的可再生绿色能源, 波浪能是由风把能量传递给海洋而产生的, 它实质上是吸收了风能而形成的。能量传递速率和风速有关, 也和风与水相互作用的距离(即风区)有关。

福建海区是我国沿海波浪较大的海区之一, 平均波高在 0.9~1.6 m 之间, 最大波高可达 16 m, 平均周期为 3.0~6.2 s, 最大周期 20.4 s。冬半年(10 月至翌年 3 月)比夏半年海浪大, 最大波高多为偏东向, 一般发生在 7~9 月台风季节。全省沿海有八个风浪较大的海区: 从北往南分别为闽峡、北茭、梅花、牛山、大岞、围头角、镇海角和古雷头。在冬季寒潮大风和台风季节时这些海域的海浪较大。

全省沿海海域波浪能平均密度为 2.6~7.3 kW/m, 但资源分布不均匀, 波浪能资源的 70% 分布于平潭岛以北沿海海域, 其值为 1.512 49 GW。福建平潭岛以北的北茭、北礮、三沙和台山的平均波高大于 1 m, 周期在 4 s 以上, 波功率密度相对较高, 储量最丰富。其中, 尤以北礮地区波浪能资源储量最大, 为 378.80 MW<sup>[2]</sup>。如图 1 所示。

## 1.3 福建海流能状况

海流能是指海水流动的动能, 外海主要是洋流, 近海主要是指海底水道和海峡中较为稳定的流动以及由于潮汐导致的有规律的海水流动。

福建沿海的海流能较为丰富, 不少水道的能量密度为 15~30 kW/m<sup>2</sup>, 具有良好的开发值, 如三都澳东冲水道(15.1 kW/m<sup>2</sup>)。各水道海流能分布较为复杂, 与周边地形有密切关系。漳浦六鳌半岛

东侧海流平均流速 0.30~1.04 m/s, 厦门湾口外至东碇岛附近平均流速 0.86~1.16 m/s, 泉州湾口平均流速 1.11~1.18 m/s, 三都澳海域的白马门水道平均流速 0.79~1.38 m/s<sup>[3]</sup>。

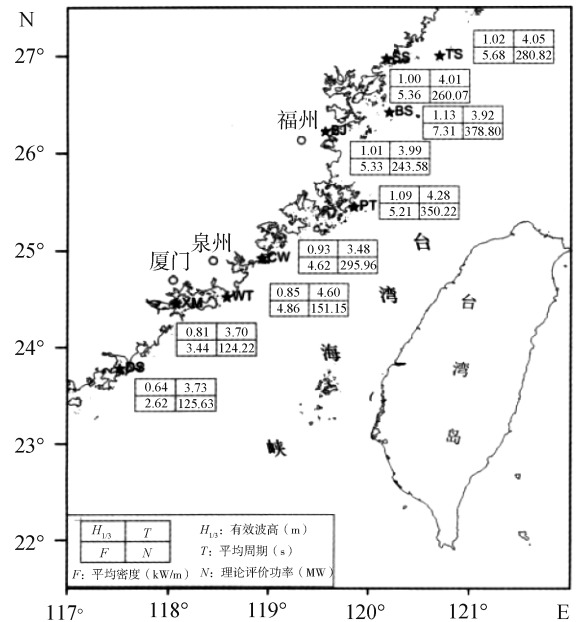


图 1 福建沿海波浪能资源分布

Fig. 1 Distribution of coastal wave energy resources in Fujian Province

## 2 当前海上风电风机基础型式

波浪发电及海流发电结合海上风电共同发电, 主要是综合利用风机已有的电力送出系统、风机基础结构及其所占用的海域。目前海上风电风机基础主要有单桩、导管架、群桩承台、漂浮式、重力式以及负压桶式基础, 现阶段我国近海海上风电项目大部分采用单桩、导管架、群桩承台基础型式, 远期开发远海海上风电时漂浮式风机基础将得到更多运用。海流发电与风力发电主要结合点在于共用基础结构, 对于目前技术较成熟的单桩、导管架、群桩承台风机基础型式, 由于其框架清晰、结构稳定且透水性好, 经改造后易实现二者基础结构的共用。波浪发电与风力发电主要结合点在于共用风机基础顶面的工作平台, 对风机基础结构影响较小。

### 2.1 适合与风力发电结合的波浪能发电型式

近年来世界各国都进行了不懈的探索和研究波浪能发电, 航标灯用微型波力发电装置现已基本成熟并进入实用阶段。波浪能发电主要是利用波浪运动的往复力、浮力产生动力或位能差, 通过能量转

换装置将波浪能转换为往复机械能,再通过动力摄取系统转换成所需的动力或电能。现有的波浪利用技术有很多种型式,按结构形式可分为振荡水柱式、摆式、越浪式、筏式、鸭式、点吸收式等,按发电设备位置可分为岸式和漂浮式。目前固定式(岸式)和海面漂浮式波浪发电均适合与风力发电相结合。

2005年在广东汕尾遮浪镇建成投产100 kW振荡水柱式波浪发电站第一次实海况试验成功。该电站为岸式,主体能抵抗50年一遇台风,工作寿命15年。在入射波高 $H_{1/10}=1\sim 3\text{ m}$ ,平均周期 $T=5\sim 7\text{ s}$ 时,平均发电功率为 $5\sim 40\text{ kW}$ ,最大发电功率100 kW。设有过压自动卸载保护、过流自动调控、水位限制、断电保护、超速保护等功能。

漂浮式波浪发电技术近几年得到较大提高,按机械原理分有串连式、直驱式、海蛇式、浮摆式等多种型式。



图2 广东汕尾岸式波浪发电站

Fig. 2 Guangdong Shanwei shore type wave power station



图3 漂浮式波浪发电装置

Fig. 3 Floating wave power generation equipment

## 2.2 适合与风力发电结合的海流能发电型式

海流能是指海水流动的动能,外海主要是洋流,洋流方向恒定、流速大;近海主要是指海底水道和海峡中较为稳定的流动以及由于潮汐导致的有

规律的海水流动。海水的密度约为空气的1000倍,能量密度大。海流能的变化平稳且有规律,海流发电机组的出力大小和时间完全可以事先准确地计算出来,这对电网供电十分有利。海流发电不需要建围堰、水闸、蓄水池,建设周期短。现今应用比较广泛的海流发电设备基本分为水平轴式涡轮机、垂直轴式涡轮机以及振荡水翼式系统3种。水平轴式涡轮机技术相对成熟,其发电设备的基础结构较易与风力发电的基础结构相结合。随着技术进步,目前流速超过 $1\text{ m/s}$ 的海流已具备开发潜力。

2008年3月24日,世界首台海流能发电机在英国斯特兰福德湾安装就位。这款名为“SeaGen”的新型海流能涡轮发电机,如图4所示,叶轮直径为18 m,形似倒置的风车,在流速为 $3\text{ m/s}$ 的工况下,发电功率可达2.5 MW。叶片可以 $180^\circ$ 定位,这样在涨潮和落潮时可以进行双向运作。每个系统的双动力部分安装在直径大约为3 m的钢管结构的翼状延伸体上。整个包括动力部分的翼状结构可以提升出海平面,进行安全维护和维修。



图4 SeaGen 海流能涡轮发电机

Fig. 4 SeaGen current energy turbo generator

2018年4月浙江大学研制的大长径比半直驱高效水平轴海流能发电650 kW机组在浙江省舟山市南部海域的摘箬山海洋科技示范岛实现成功发电,该设备具有获能高效性、运行可靠性和供电稳定性<sup>[4]</sup>。该机组采用二叶片,如图5所示,启动流速 $0.3\text{ m/s}$ 为世界最低<sup>[5]</sup>。

## 3 综合用海立体式发电的初步构想

通常一个100 MW的海上风电场需要 $16\text{ km}^2$ 的海域,风机之间距离在 $0.6\sim 1.1\text{ km}$ ,风机基础为透水建筑物。波浪发电、海流发电结合海上风电共同发电,主要是综合利用风机已有的电力送出系统、风机基础结构以及基础占用的海域,将每个风

机基础均作为一个独立的海岛型式, 以其为中心形成风能、波浪能及海流能综合运用。



浙大650 kW机组海上安装



图5 浙江大学海流能发电机

Fig. 5 Zhejiang University current energy turbo generator

针对不同海域的风力和海流情况, 考虑到海上风电的技术成熟度和商业化水平, 以海上风电为主体, 搭配波浪发电和海流发电进行组合。各发电设备生产的电能统一接入到风机塔筒底部变压器, 再一并送出。对于风机基础水下结构部分, 若采用的是桁架式导管架结构或群桩结构, 则在导管或桩基之间悬挂海流发电装置, 或采用悬挑结构将海流发电装置悬挑于基础两侧。

对立体式发电初步构想主要有三种型式:

1) 风电发电 + 风机基础平台岸式波浪发电 + 水下海流发电。

以风机基础平台为中心, 高空为传统的风电发电; 加大风机基础顶面的工作平台, 在平台上增设岸式振荡水柱波浪发电的陆上设备, 远离塔筒爬梯方向设置波浪能采集器; 在风机基础水下结构部分悬挂或悬挑海流发电装置。

2) 风电发电 + 水面漂浮式波浪发电 + 水下海流发电。

以风机基础平台为中心, 高空为传统的风电发电; 在风机基础平台周边设置漂浮式波浪发电, 仅保留通往风机塔筒爬梯方向作为交通的水面通道; 在风机基础水下结构之间悬挂或悬挑海流发电装置。

3) 风电发电 + 波浪发电。

该组合方式主要用于宽阔海域的远海风电场, 其海流流速不足以开发海流发电, 但是具有丰富的风能和波浪能。该处风力发电和波浪发电结合方式, 主要采用加大风机基础平台搭配岸式波浪发电或海上风电直接搭配周边水面漂浮式波浪发电。

## 4 福建可综合利用的海上风电场址

根据福建省海上风电规划, 结合福建省风能、波浪能以及海流能的分布情况, 平潭海坛海峡(规模 100 MW)、平潭大练(规模 300 MW)、平潭草屿(规模 150 MW)以及福清海坛海峡(规模 300 MW)四个海上风电场是极佳的综合利用场址。该区域年平均风速可达  $9 \sim 10$  m/s, 波浪能平均密度为  $5.3 \sim 6.5$  kW/m, 水域中存在较多岛屿, 增加了水道海流流速, 经初步测量局部水道流速可达  $2$  m/s。对于上述四个风电场, 建议探索风能 + 波浪能 + 海流能共同发电的模式。

另外宁德霞浦海上风电场(规模 1.65 GW)、连江外海海上风电场(规模 500 MW)以及长乐外海海上风电场(规模 3.50 GW)波浪能平均密度约为  $5.68 \sim 7.31$  kW/m, 均有风能结合波浪能共同利用的潜力, 对于以上 3 个风电场, 建议探索风能 + 波浪能共同发电的模式。

上述 7 个海上风电场址均处于台湾海峡北侧入口附近, 受台湾海峡狭管效应影响, 风资源非常丰富。按照我国现行海上风电 0.85 元/kW 的上网电价、当前风机设备能力、施工技术水平和银行利率, 该海域范围内的海上风电项目资本金财务内部收益率为  $12\% \sim 18\%$ , 风电项目本身已具备良好的经济性。它们与波浪能发电或海流能发电结合时, 只要波浪能项目或海流能发电项目自身能自负盈亏, 再加上互相结合时降低共用设备投资、共同施工的规模效应以及投产后共同运营降低维护成本, 则能进一步提高共同体的经济性。

## 5 发展立体式发电下一步需要关注的问题

海洋立体式发电从理论走向实用性, 需要进一步降低发电成本, 提高能量俘获及转换的效率, 提升设备可靠性和可维护性, 解决防腐防生物附着等共性技术瓶颈, 还要关注以下几个问题:

### 5.1 关注低流速的海流发电设备技术突破

与利用陆地上的河流发电相比, 海流发电既不受洪水威胁, 又不受枯水季节影响, 几乎以常年不变的水量和一定的流速流动, 完全可成为人类可靠的能源。一旦低流速的海流发电设备技术突破, 海流能与海上风电大规模共同开发将成为现实, 这将有可能开辟中国的可再生能源综合利用新途径。

## 5.2 关注海流发电对局部海洋环境产生的影响

海洋生物病害多因水体交换不良导致,结合海上风电风机基础的人工造礁功能,海流发电时通过涡轮机叶片旋转产生水体湍流,使底层水与表层水体产生剧烈混合,将表层高溶解氧带入底层,增加底层生物的增殖并减少病害,进而致使以此为饵的鱼类数量增长。同时,我们也应关注处于海域固定位置的涡轮机叶片旋转产生的噪声对特定鱼类洄游路线可能会造成影响。

## 5.3 关注立体式发电整体系统的结构受力状况和疲劳损伤,避免系统共振

按照立体式发电构想,作为一种新型的结构体系,风、波浪和海流是整个结构承受的主要荷载,这些荷载具有明显的动力特性,海上高耸的海上风机结构体系在这些动力荷载作用下将产生显著的动力特性。这些动力效应总是趋向于增加应力数值并损害结构的长期承载能力。应对叶片+轮毂+机舱+塔架+波浪发电支撑结构+风机基础+海流发电支撑结构+地基系统进行整体模态分析,以掌握结构的动力特性和响应。有针对性的分析受循环应力作用下的结构疲劳破坏,对于采用桁架式导管架的基础重点对结构相关管节点和杆件进行疲劳分析;对群桩承台式基础需计算混凝土的疲劳损伤和疲劳寿命。对照各发电设备厂家提供的叶片转动频率、塔筒自振频率以及波浪频率,避免系统发生共振。

## 5.4 关注台风天气对立体式发电的整体系统破坏

设备生存是立体式发电的整体系统首要解决的问题。特别对于福建省海域而言,极端台风天气较多,必须考虑风荷、波浪和海流同时对整个系统承重结构的冲击,并要注意防范台风对波浪能发电装置的本身破坏,也要避免台风造成波浪能发电装置失控对风机基础撞击破坏。

## 6 结论

根据波浪能和海流能技术水平情况,结合福建省的风能、波浪能以及海流能分布情况,福建省已规划的部分海上风电场址具备综合利用波浪发电和海流发电的技术可行性。

建议对有综合利用可能的海上风电场址展开长期的海流和波浪的观测,进一步收集实测资料;详细估算其发电成本,做好经济可行性分析;在降低

发电成本的同时,着力提高装置的发电稳定性、环境适应性与生存能力。

### 参考文献:

- [1] 福建省水利水电勘测设计研究院. 福建省海上风电场工程规划报告 [R]. 福州:福建省发展和改革委员会, 2017: 29-29.  
Fujian Provincial Investigation Design & Research Institute of Water Conservancy & Hydropower. Fujian offshore wind farm project planning report [R]. Fuzhou: Fujian Provincial Development and Reform Commission, 2017: 29-29.
- [2] 张军, 许金电, 郭小钢. 福建沿海海域波浪能资源分析与评价 [J]. 台湾海峡, 2012, 31(1): 130-135.  
ZHANG J, XU J D, GUO X G. An evaluation and analysis of the ocean wave energy resource in nearshore waters of Fujian [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2012, 31(1): 130-135.
- [3] 国家海洋局第三海洋研究所. 福建海域海洋能源概况及海流、波浪能的开发利用 [R]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2012.  
Third Institute of Oceanography State Oceanic Administration. Survey of marine energy resources in Fujian Province and development and utilization of current and wave energy [R]. Xiamen: Third Institute of Oceanography State Oceanic Administration, 2012: 10-22.
- [4] 浙江大学海洋研究院海洋能发电技术研究团队. 我国半直驱高效水平轴海流能发电系列装备舟山诞生记 [EB/OL]. (2018-04-11). [http://oc.zju.edu.cn/chinese/redir.php?catalog\\_id=5855&object\\_id=157370](http://oc.zju.edu.cn/chinese/redir.php?catalog_id=5855&object_id=157370).
- [5] 国家科学技术奖励工作办公室 2018 年国家科学技术奖受理项目机械与动力组. 高效率水平轴海流能发电技术与系列装备 [EB/OL]. (2018-03-23). [http://www.nosta.gov.cn/upload/2018slxmg/b\\_fm308/fmIndex.html](http://www.nosta.gov.cn/upload/2018slxmg/b_fm308/fmIndex.html).

### 作者简介:



ZHANG Y Q

张毅强(通信作者)

1975-, 男, 安徽合肥人, 高级工程师, 学士, 福建大唐国际新能源有限公司发展与规划部主任, 2003 年开始从事风电项目, 作为骨干参与平潭长江澳海上风电项目、六鳌海上风电项目开发。作为大唐集团公司主要技术人员, 参加全国首个海上风电(上海东海大桥海上风电)业主特许权投标和江苏四个海上风电业主特许权投标。在国内杂志发表过多篇内陆风场和海上风电论文(e-mail) 190694774@qq.com。

(责任编辑 李辉)