

引用格式:王晴勤,温国标.基于交能融合的分布式海上风电选址与布置[J].南方能源建设,2024,11(2):59-67. WANG Qingqin, WEN Guobiao. Site selection and layout of distributed offshore wind power based on energy and transportation integration [J]. Southern energy construction, 2024, 11(2): 59-67. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.06.

基于交能融合的分布式海上风电选址与布置

王晴勤[✉], 温国标

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的]在近海浅水海上风电场场址资源日益稀缺,场址逐步向深远海、大型化、基地化发展的背景下,探讨一种交能融合的分布式海上风电,以规避开放式水域的大型海上风电场常出现的涉海范围广、征海面积大、影响通航安全等问题。[方法]基于已建或正在规划的大型港区配套建设的防波堤进行优选场址,在分析港池与防波堤的功能与布置的基础上,通过对海上风力发电机组及海底电缆的优化布置,可实现技术与经济、政策与环境等多方面的提升。[结果]对比国内数十个开放式水域已建海上风电工程,基于交能融合的分布式海上风电场可显著地缩小场址涉海范围、减少征海面积,并降低对周边区域船舶海上通行的影响,是一种相对安全、经济、环保的海上风电场址类型。[结论]通过对交能融合的分布式海上风电选址与布置的探讨,阐述了该类型海上风电场在节约用海、减少海上碍航物、捆绑送出和就地消纳、施工与运维等多方面的优点,并可将其作为现阶段单一海上风电类型的重要补充,成为一种新的增量海上风电场址资源。

关键词: 交能融合; 选址; 分布式海上风电; 总平面布置; 节约用海

中图分类号: TM614; U491

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)02-0059-09

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.06

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Site Selection and Layout of Distributed Offshore Wind Power Based on Energy and Transportation Integration

WANG Qingqin[✉], WEN Guobiao

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] In the backdrop of the increasingly scarce availability of sea-based wind farms in near-sea shallow water areas and the trend towards deeper and wider waters, as well as larger and more concentrated facilities, a discussion is presented on a distributed offshore wind energy system that integrates energy and transportation, in order to avoid the commonly encountered issues of large-scale offshore wind farms in open waters, such as extensive sea-area requirements and impacts on shipping safety. [Method] Based on the existing or planned offshore wind farms in large ports, the best site was selected based on the built-in breakwaters that accompanied the port. After analyzing the functions and layouts of the port basin and the breakwater, the optimal layout of the offshore wind turbines and seabed cables was achieved through optimization. This could lead to improvements in technology, economics, policy, and environment in various aspects. [Result] Compared to over a dozen existing offshore wind farms built in open waters in China, the distributed offshore wind farm based on energy and transportation can significantly reduce the scope of operations and the area required for construction the sea-area, also lower the impact on shipping in the surrounding area. Furthermore, it is a relatively safe, economic, and environmentally friendly type of offshore wind farm site. [Conclusion] Through discussions on the selection and layout of distributed offshore wind farms based on energy and transportation, the advantages of this type of offshore wind farm, such as reducing the required sea area, minimizing marine obstacles, integrating supply and consumption, and reducing construction and operation costs, are described. This type of offshore wind farm can serve as an important supplement to the current single type of offshore wind farm and

收稿日期: 2023-05-23 修回日期: 2023-06-09

基金项目: 中国能建设广东院科技项目“大规模海上风电场细分场址及容量控制指标研究”(EV06731W)

become a new type of incremental offshore wind farm site resource in the current stage.

Key words: energy and transportation integration; site selection; distributed offshore wind power; layout; sea area saving

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

近年来,中国海上风电发展迅速,近海浅水海域的场址资源日益稀缺。随着更大单机容量风机的不断投产下线,位于开放性水域的海上风电场逐步朝着大型化、基地化、深远海化发展^[1]。2022年国家发展改革委、国家能源局等九部门联合印发的《“十四五”可再生能源发展规划》提出加快推动海上风电集群化开发,重点建设山东半岛、长三角、闽南、粤东和北部湾五大千万千瓦级海上风电基地^[2]。大型海上风电基地能形成良好的规模效应,是我国改善能源结构,实现碳达峰、碳中和目标的重要一环。然而,风电场的布置受到多种因素的影响,例如航路、锚地、港口、保护区、海流、军事和鸟类迁徙等^[3],大型场址还面临着占用较大面积海域和集中并网难以消纳等问题。因此,增加诸如分布式类型的海上风电是对场址普遍大型化趋势的有益补充。

同时,交通运输部发布《扎实推动“十四五”规划交通运输重大工程项目实施工作方案》,明确将绿色低碳港口码头作为一种重点应用场景进行推广^[4]。港区能源结构迫切需要绿色能源以实现节能降碳的目的^[5]。各类已建或在建港池所配套建设的防波堤附近海域,因其受到防波堤“保护”的特殊地理位置和港池及其后方主体工程的绿色能源需求,使其成为分布式海上风电场的理想区域。

综上所述,基于大型交通枢纽港区选址与布置分布式海上风电,能减少开放性水域大型海上风电场存在的部分问题,为稀缺的近海、浅水海上风电提供增量场址资源,成为现阶段单一类型海上风电场址的重要补充,也有利于实现交能融合,推进低碳港区与海上风电绿色能源的高质量融合发展^[6]。

1 现有海上风电场址类型

1.1 开放性水域海上风电

目前,我国海上风电场基本采取独立选址的方式,单个场址容量多在0.2~1GW之间,主要以位于开放性水域的近海浅水场址为主。千万千瓦基地的

大型场址多位于深远海,基地内单个场址容量一般不小于1GW。上述场址选址时需要规避与其用海功能相冲突的因素(各类保护区、养殖区、倾倒区等功能区),并与航线、锚地等保持一定的安全距离后,再布置海上风力发电机组及其配套海底电缆等设施。通常,海上风电建(构)筑物主要包括5个部分:海上风力发电机组、风机间集电海底电缆、海上升压站或换流站、送出海底电缆和陆上集控中心或换流站,见图1。其中,前4个部分是工程征海的主要类别。以开发较早的东南某省近海浅水区域的场址为例,单个场址容量介于0.198~1GW之间,项目征海面积在135~670hm²,并随着场址的离岸距离及规划容量地增加而增加。相比之下,场址外缘风机围成的涉海范围则更大。根据《国家海洋局关于进一步规范海上风电用海管理的意见》,“单个海上风电场外缘边线包络海域面积原则上每10万kW控制在16km²左右”,对应上述场址容量用海原则,单个场址的涉海面积为32~160km²,其大小主要与场址规划容量相关。深远海大型场址规划容量更大、离岸距离更远,场址的征海与涉海范围相应更大、更广,海上通航安全及电能送出等问题可能更加明显。

1) 风机及海底电缆的布置可能会不同程度地影响周边海域的通航需求。海上航行通常没有具体的航线范围,其航线多依据航行习惯而定。风机和海底电缆的布置或将影响和改变航行习惯,一定程度限制航行的自由度。

2) 占海面积大,建设成本增加,兼容性用海尚处于探索阶段,实际应用相对较少。深远海风电场因离岸距离和浮式基础比例的增加^[7],将导致征海面积大幅增加。同时,风电场与其他海域使用的兼容还在探讨试验阶段,大型风电场涉海范围仍具较大的排他性^[8]。

3) 送出及就地消纳难度增加。随着风电场规模逐渐增加,场址所在区域的电网消纳能力可能存在制约^[9],导致产生的电能需要长距离输送至其他负荷中心区域,增加送出路由建设的难度和成本^[10]。

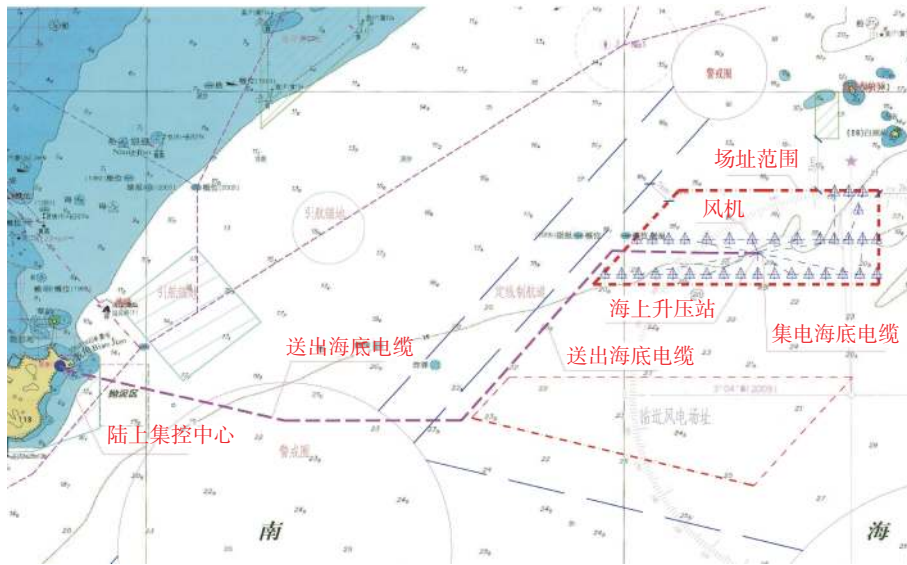


图 1 开放性水域场址布置示意图

Fig. 1 Site layout for open-water area

1.2 海岛周边海上风电

该类风电场一般选址于小型或微型海岛周边海域, 利用几个或多个小岛形成的、相对不受海上通航影响的海域布置海上风电^[1]。因其得天独厚的地理位置, 此类场址与海上航行的相互影响相对较小, 见图 2。此类风电场规模一般不大, 以南海某场址为例, 规划总容量约为 198 MW, 通过风电场的建设, 可将

周边海岛的电网与主电网相连, 增加海岛电网的稳定性, 或可部分解决海岛供电难、用电贵的问题。但受制于天然条件, 此类场址资源较为稀缺, 且单位容量的占海与涉海面积仍然较大: 本项目单位征海面积约 25.43 hm²/万 kW, 几乎占用全部海岛围合的海域面积, 一定程度构成排他性占用, 降低了诸如旅游用海等未来海域使用的多种可能性。

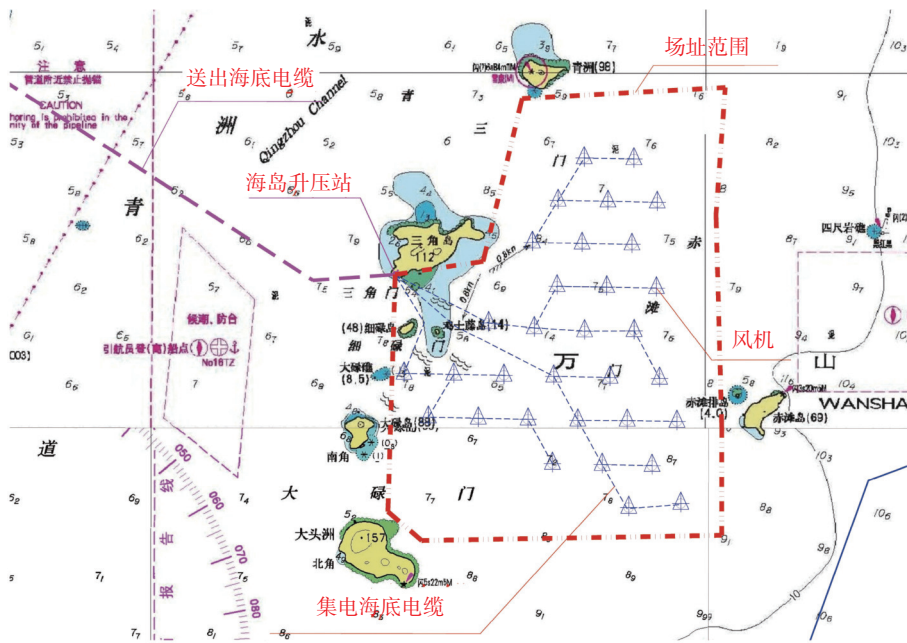


图 2 海岛周边场址布置示意图

Fig. 2 Site layout for around a remote island

2 交能融合形式的海上风电选址

我国岸线资源丰富,拥有大陆海岸线 1.84 万 km、岛屿海岸线 1.4 万 km、南京以下长江岸线 800 余 km,分布有 61 个沿海港口,其中主要港口 27 个,为保障港口陆域及船舶停泊作业安全,需建设港口护岸、防波堤等防护建筑物提供掩护^[12]。港池及其配套建设的防波堤工程因其建设目的的不同,其用海类型也不尽相同。根据海域使用分类规范,类型包括渔业用海中的渔业基础设施用海、工业用海、交通运输用海、旅游娱乐用海中的旅游基础设施用海、特殊用海中的海岸防护工程用海等。

2.1 用海适用性

海上风电工程的用海细分类型属于工业用海中的电力工业用海。企业专用码头和港池用海同属于工业用海,其细分类型为其他工业用海,该类港池与防波堤是海上风电选址的重要潜在资源。虽然大型枢纽港区建设的港池及防波堤工程属于交通运输用海,与海上风电工程用海类型不同,但交通运输工程的功能属性相对较为集中,其与海上风电工程的功能兼容性较好,也可作为海上风电选址的重要目标区域。相比之下,渔业、娱乐设施及特殊用海这三种类型,或因港池防波堤规模相对较小、或因港池及其周边对景观、环境等要求较高、或因特殊要求等原因不宜作为海上风电普选场址的重点区域。

工业与交通项目新建或已建的港池及其配套建设的防波堤工程,其本身及附近海域因工程建设的需要,已经基本剔除了与工业和交通运输用海冲突的用海类别。在此范围布置海上风电,可以大大减少场址与周边利益相关用海方的冲突,更好地符合该区域的海洋功能区划等相关规划,提高项目用海的合规性和合理性。自然资源部最新的《国土空间调查、规划、用途管制用地用海分类指南》中对于上述类型用海的分类名称进行了调整,但海上风电工程与上述工业及交通用海的兼容性仍然适用。

2.2 通航安全性

港池及防波堤工程的建设对港池外部及其周边的船舶航行形成了天然的屏障与提醒,对进出港池内的各类船舶则规划有固定的航道,限定了航行的范围,促使进出港池的船只无法像在外海开放水域航行时那样自由。进出港船只在临近港池时,船上人员需提高警戒,降低船只航速、摆好船位、进入既

定航道从而停入港池内码头。因此,相比开放水域海上风电场址,在防波堤区域、避开进出港航道范围布置海上风电,充分利用了因建设港池及防波堤形成的相对安全独立海域的优势,基本不会形成新的碍航物,可大大减少海上风电建设对周边船只航行的影响。

2.3 系统与送出

工业与交通项目配套建设的大型港池及防波堤,一般非单独、孤立地建设,而是多服务于后方不同的大型工业项目或专项基地,以及枢纽型的交通港等。项目包括有各类滨海电厂、石化类项目、大型制造业工业园区、集装箱码头及关口等多种类型,此类项目均有一定的电力负荷需求,如低碳或零碳港^[13]、智能生态制造基地等新兴项目,海上风电生产的绿色能源与其定位十分匹配。

随着海上风电场规模的不断增大,风电的消纳问题亟须解决,风电接入后的电网安全性也面临挑战^[14]。交能融合的分布式海上风电受制其附近可供布置的海域范围影响,场址规模和规划容量相对较小,根据现有风力发电机组的单机容量以及对应防波堤工程的可供布置长度,其规划总容量一般不超过 150 MW,可较好地适应后方项目的能源需求,形成一种灵活的分布式的能源供应方式^[15],部分或全部解决其用电需求,就地消纳后,超过负荷需求的部分再考虑上网发电。当后方工业项目为滨海发电厂时,富余的绿色能源可与稳定的火电或核电捆绑送出^[16],降低风能对于电网的影响,增加海上风电并网的稳定性,实现绿色安全的清洁能源。

3 防波堤海上风电布置

防波堤海上风电场总平面布置首先需考虑各类风场设施与整个港池及防波堤的相互关系,以不影响港池及防波堤本身的主体功能为前提。在此原则下对风力发电机组、集电海底电缆、海上升压站、送出海底电缆和陆上集控中心这 5 个主要部分进行总体布置。由于场址临近港池及防波堤,风机与陆上集控中心之间的距离较近,风电场总体布置时可考虑通过集电海底电缆直接登陆接入陆上集控中心内,将风电场优化为风力发电机组、集电海底电缆和陆上集控中心 3 个单元,节省海上升压站与送出海底电缆的建设成本,减少相应的用海面积,实现节约与集约用海。

3.1 风机布置

防波堤主要为了减少风浪对于港池的影响,保证港池内水域泊稳条件的要求^[17],防波堤防护方向一般为该海域常年主导风浪朝向,即防波堤堤身与主导风浪朝向近似垂直布置。防波堤海上风电场风机排布需将防波堤的布置作为前置条件,在常规布置原则与方法中,可综合考虑主导风能方向与等间距的排布方法,可采用自适应排布法,根据风电机组叶轮直径与风能密度方向分布,设置机位间的最小间距。防波堤海上风电分布式及寄生式的特殊属性,决定了风机不适宜大规模、多行列的布置。为了不新增碍航构筑物、减少新增涉海范围,根据风机行距排布的间距要求,风机宜单行布置。平行于防波堤布置风机,可以充分利用该区域的主导风能方向^[18],使得所有风机均垂直于主导风向。单排垂直于主导风向布置的风机,可以最大限度利用防波堤长度布置,有效地减少尾流损失,提高发电效率。

风机的布置方式主要可归纳为脱开布置和结合布置2类,两者之间最大的区别在其适用范围及对港池与防波堤的影响差异。

3.1.1 脱开布置

脱开布置时风机应靠近但不干涉防波堤排布,风机与防波堤相互独立,风机基础全部位于防波堤结构范围外。此种布置方式可最大限度地降低对防波堤本体结构的影响。为保证港池内船舶停靠与航行不受风机运行的影响,布置时需复核港池内航行船舶的尺寸参数、防波堤堤面人员与车辆巡检的空间需求,避免风机叶片的扫风面进入上述空间范围,必要时需调整风机选型或轮毂高度以达到相关要求。

脱开布置方案可适用于已建、在建、规划等多种状态下的防波堤工程,不受防波堤工程状态或建设进度的影响,对于已建防波堤工程不会造成破坏,进而影响其原有功能。为了缩小涉海范围、减少征海面积、降低对周边海上航行的干扰,风机还应尽可能贴近防波堤布置。根据海籍调查规范,海上风力发电项目用海,单个风机塔架以塔架中心点为圆心,中心点至塔架基础最外缘点外扩50m为半径的计算规则,靠近布置可核减因向防波堤侧外扩50m而与防波堤用海重合部分的征海范围,通过优化布置后风机基础征海面积减少比例可接近50%。由于有防波堤隐形的保护,靠近布置的风机对港池内外的船舶航行影响较小,解决了开放水域海上风电场选

址与布置的最主要限制。风机列距在保证风机安全的前提下适当加密布置,提高规划容量。

3.1.2 结合布置

结合布置则将风机与防波堤堤身结合,组成组合结构。该方案更适用单桩基础的风机布置,通过优化设计可一定程度增加结构的稳定性和整体性。此布置方案基本无需新增涉海范围及征海面积,对外部船舶的航行影响极低。但由于需要与防波堤结合设计,该方案仅适用于新建防波堤工程,两者的建设进度需高度一致,在实际工程中应用场景较少。

在新建防波堤上布置风机,将影响防波堤本身的日常巡检需求。堤上布置的风机,其叶轮的扫风范围势必将进入港池内,常规风机叶尖与海面的距离20~30m,可能影响港池内船舶的航行与停靠。国内典型1000t货船的货仓高度约20m,大型沿海超万吨港池内行驶的船舶高度可超过60m,结合布置方案的风机将缩减港池内船舶可航行的范围,影响港池的使用功能。

3.2 集电海底电缆布置

交能融合的防波堤海上风电场无需新建海上升压站及送出海底电缆,风机之间的集电海底电缆兼具送出海底电缆的功能。风机多为单行布置,海底电缆布置考虑的因素相对单一,主要根据规划容量选择合适电压等级的海底电缆,结合登陆点与陆上集控中心的位置,避免进线海底电缆穿越港池内部。基于节约用海与便于运营检修的原则,海底电缆布置在满足电缆施工及运维空间需求的基础上,可充分利用风机与防波堤之间的海域布置,在防波堤护石上布置海底电缆。该方案无需新增征海面积,便于电缆施工,也有利于电缆的日常运营与检修维护。

3.3 陆上集控中心布置

陆上集控中心的布置与常规海上风电场的主要区别在于选址与统筹。为了避免穿越防波堤及港池,集电海底电缆宜从防波堤头尾两侧登陆,导致登陆点与集控中心多布置在风电场端部。位于滨海发电厂或大型港区的场址,集控中心宜统筹考虑,直接接入港区变电站或系统变电站,节约稀缺的滨海土地资源。

4 大型港区防波堤海上风电实例

4.1 典型方案布置

某海域集装箱海岛型深水枢纽港,港口及其后

方港区有较大的用电需求。风电场附近区域年平均风向多为北风,次常风向为东南风,轮毂高度年平均风速超过 7.5 m/s,平均风功率密度超过 400 W/m²,风能资源较为丰富。港池防波堤单侧上风向布置,水深介于 10~18 m 之间,总长接近 8 km,防波堤拟采用桶式基础结构,两侧护石防护。

本工程选址在防波堤北侧外海域,距离防波堤中心线介于 50~250 m 之间。场址宽约 200 m,长约 7.5 km,涉海面积约 1.5 km²,见图 3。

风机平行防波堤单行布置,风机中心点位距离防波堤中心线约 70 m,排布在防波堤头、尾加宽段防护区域之间的海域,减少因风机布置对周边航行的影响,也保证风机自身安全,避免船只碰撞。风机基础征海面积部分在原防波堤征海范围,该部分无需新增用海。风机间列距按 3.5D 考虑,共布置 11 台 13.6 MW 风机,总规划容量约 150 MW,见图 4。

集电海底电缆采用 66 kV 电压等级,共布置 2 回,每回串联 5~6 台风机。电缆均布置在靠近防

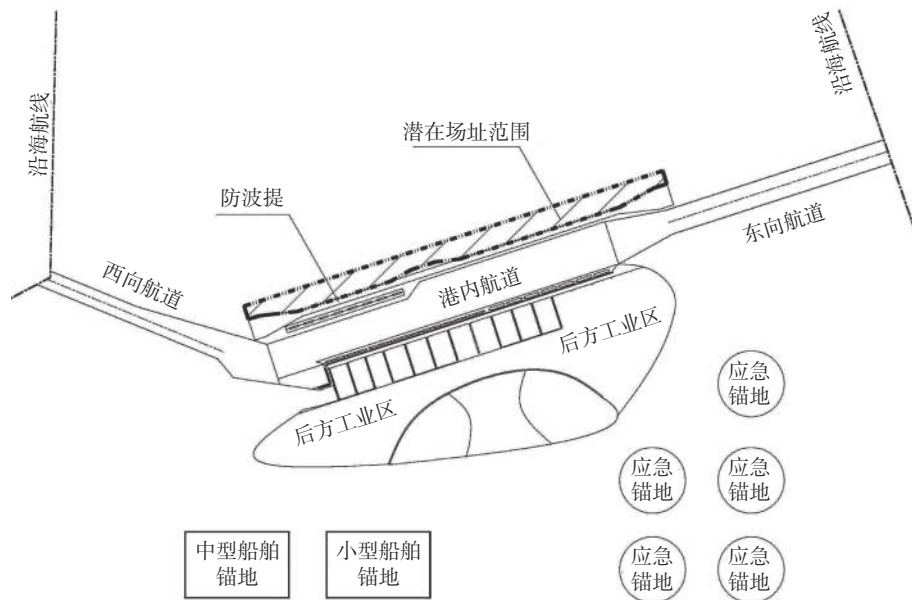


图 3 防波堤与风电场区域关系图

Fig. 3 Relationship between seawalls and wind farms

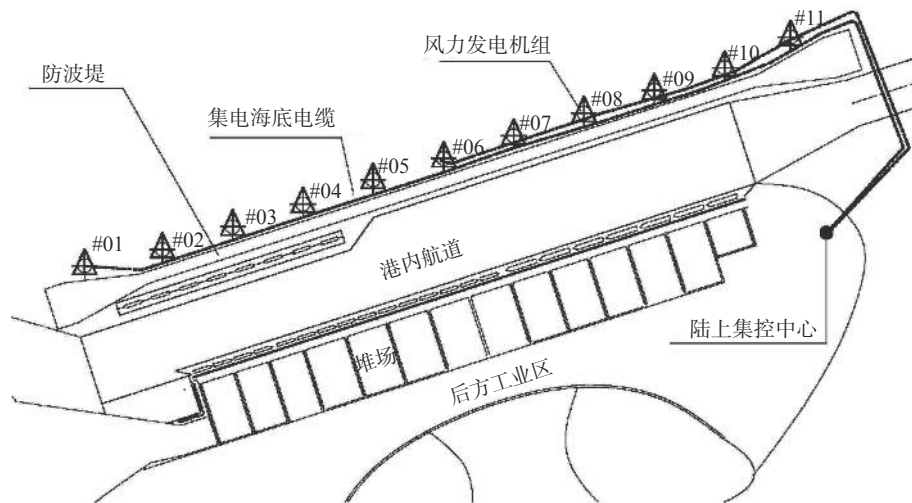


图 4 防波堤外海上风电平面布置图

Fig. 4 Offshore wind farm layout outside the seawall

波堤一侧的护石上,既避免对防波堤结构本体的影响,又方便电缆的敷设及稳定、便于检修维护,见图 5。

除接入陆上登陆点一小段外,其余海底电缆均位于防波堤原征海范围内,无需新增用海,见图 6。

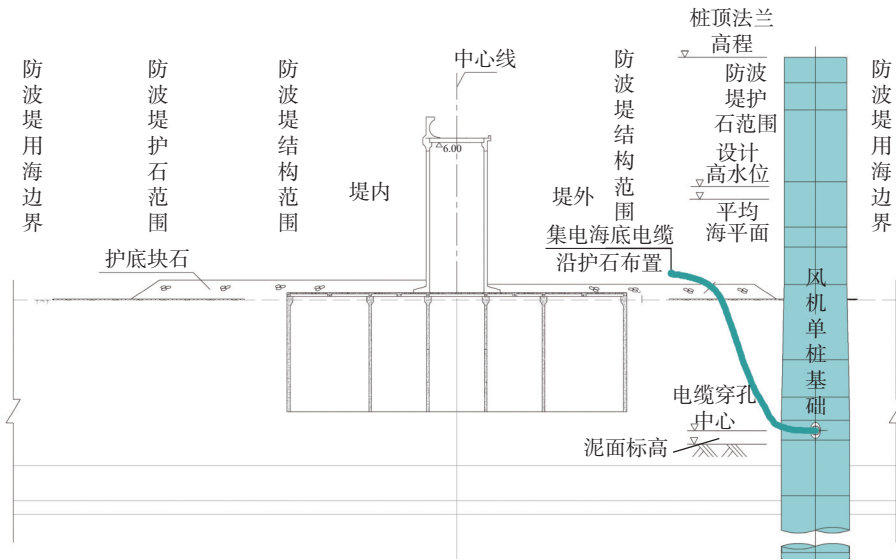


图 5 防波堤外海上风电断面示意图

Fig. 5 Waterfront wind farm perspective diagram

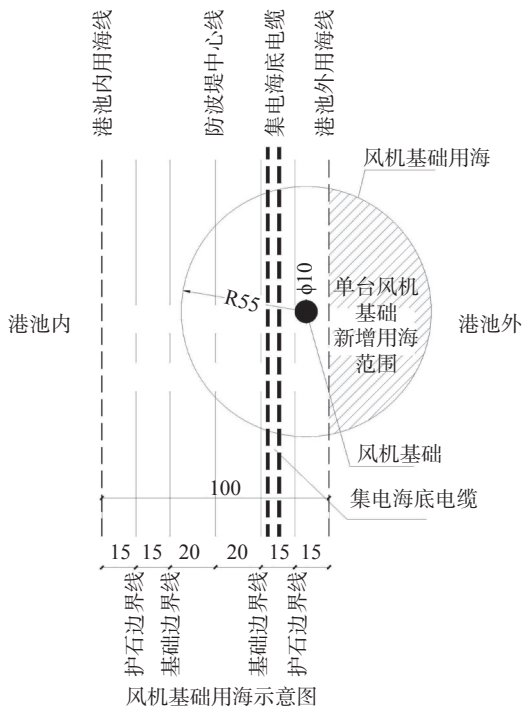


图 6 用海节省示意图

Fig. 6 The reduction in sea use

4.2 对比分析

本工程相比同类型、相同容量开放式水域的海上风电项目,此布置方案主要有 4 个方面的优势。

1) 征海面积大为减少,节约了宝贵的海洋资源。

根据对国内近 40 个水深条件 10~50 m、离岸距离 10~89 km 的已建或在建项目进行研究,该类项目总规划容量介于 0.198~1 GW,单位容量征海面积介于 4.6~25.4 hm²/万 kW,均值约 11.8 hm²/万 kW,本工程单位容量征海面积不到 1.5 hm²/万 kW,减少比例超过 80%。

2) 缩小涉海范围,减少排他性用海面积。

本工程规划容量 150 MW,涉海范围长约 7.5 km,宽约 200 m,总面积约 1.5 km²,根据业内“10 万 kW 装机容量涉海范围不超过 16 km²”的一般标准,本方案涉海面积不到标准的 10%。

3) 减少了对周边海域海上通行的影响,提高了船舶通航及自身风机的安全性。

4) 海底电缆在防波堤护石上布置,提高了电缆敷设与检修维护的便利性。

此外,大型港区防波堤外建设的分布式海上风电场相比开放式水域大型海上风电场址,无需配套建设海上升压站及高电压等级的送出海底电缆,节省相应用海面积的同时,降低了工程建设的成本。同时,防波堤场址的风机和集电海底电缆,其安装与运营维护可考虑利用防波堤堤身结构作为施工场地,减少部分海上施工运维作业,增加施工窗口期,具体对比如表 1 所示。

表 1 两类场址对比表

Tab. 1 Comparison table of two types of sites

类别	常规开放式水域海上风电场	交能融合分布式海上风电场	备注
水深条件	10 ~ 50 m	10 ~ 13 m	—
离岸距离	10 ~ 89 m	30 km	与陆域最近距离
征海面积	4.6 ~ 25.4, 均值11.8(hm ² /万kW)	约1.5(hm ² /万kW)	单元容量用海面积
涉海范围	行业要求10(万kW/16 km ²)	约1(10万kW/16 km ²)	每10万kW装机容量涉海范围
通航安全	视场址周边航线情况, 一般需新增碍航区, 部分场址影响较大	受防波堤“保护”, 无新增碍航点, 影响较小	—
施工与运维	海上施工作业, 窗口期受限	部分可考虑借助防波堤进行施工与运维, 可延长窗口期	—
建设设施	一般包含5部分: 风机、集电海底电缆、海上升压站、送出海底电缆、陆上集控中心	仅需3部分: 风机、集电海底电缆、陆上集控中心。可节省用海面积, 降低建设成本。	—

5 结论

交能融合的防波堤外海上风电作为一种分布式海上风电类型, 是对日益大型化、基地化海上风电场的有益补充, 是一种拓展近海、浅水增量场址资源的全新思路。该方案同样可应用于深远海新建或规划的防波堤工程, 有较为广泛的应用场景。在交能融合^[19]、源网荷储等创新的能源供应模式不断涌现的背景下, 在防波堤外布置海上风电不失为一种低碳可行的解决方案。

文章探讨了交能融合的分布式海上风电的选址与总平面布置, 因地制宜地对选址于防波堤外的场址进行优化布局, 减少开放式海域大型海上风电场在海域使用、船舶通行等方面的负面影响。然而, 针对风机与防波堤之间冲刷、淤积的相互影响, 临近已建构筑物的风机施工安装问题, 以及风机运行对港池陆域及船舶雷达的影响仍然值得进一步深化研究。同时, 由于其特殊的地理位置, 因风电场的建设对港池后方陆域相关利益者可能造成的诸如视线景观遮挡^[20]、噪音干扰等的负面影响, 需足够重视并研究创新的解决方案, 并应遵循宁缺毋滥的原则, 使交能融合的分布式海上风电成为真正绿色、安全、环保的清洁能源。

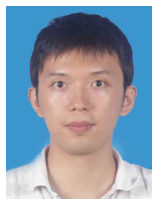
参考文献:

- [1] SOARES-RAMOS E P P, DE OLIVEIRA-ASSIS L, SARRIAS-MENA R, et al. Current status and future trends of offshore wind power in Europe [J]. *Energy*, 2020, 202: 117787. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117787.
- [2] 赵靓. 五大千万千瓦级海上风电基地周边配套产业加紧完善 [J]. *风能*, 2022(10): 44-47. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2022.10.010.
- [3] 王晴勤. 广东省海上风电场选址制约因素探讨 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2011, 44(增刊1): 6-10.
- [4] 张力, 张炳成, 黄晶晶, 等. “源网荷储”构建交能融合发展数智赋能推动交通绿色转型 [J]. *中国勘察设计*, 2023(增刊1): 10-13.
- [5] 周文峰, 张凯, 祖巧红, 等. 风电和光伏在绿色港口建设中的应用 [J]. *港口装卸*, 2023(2): 36-38 DOI: 10.3963/j.issn.1000-8969.2023.02.012.
- [6] 宋海良. 推进交通与能源高质量融合发展 [J]. *国企管理*, 2023(4): 56-58. DOI: 10.3969/j.issn.2095-7599.2023.04.023.
- [7] 王征. 英国漂浮式海上风电开发的用海权规划 [J]. *风能*, 2022(12): 44-51. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2022.12.013.

- ZHAO L. Accelerate the improvement of supporting industries around the five major 10 million kilowatt offshore wind power bases [J]. *Wind energy*, 2022(10): 44-47. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2022.10.010.
- WANG Q Q. Restricting factors of offshore wind power farms location in Guangdong province [J]. *Engineering journal of Wuhan university*, 2011, 44(Suppl.1): 6-10.
- ZHANG L, ZHANG B C, HUANG J J, et al. "Source-grid-load-storage" building block for energy integration and digital intelligence drives transportation green transition [J]. *China engineering consulting*, 2023(Suppl.1): 10-13.
- ZHOU W F, ZHANG K, ZU Q H, et al. Application of wind power and photovoltaics in green port construction [J]. *Port operation*, 2023(2): 36-38. DOI: 10.3963/j.issn.1000-8969.2023.02.012.
- SONG H L. Promoting the high-quality integration development of transportation and energy [J]. *China state-owned enterprise management*, 2023(4): 56-58. DOI: 10.3969/j.issn.2095-7599.2023.04.023.
- WANG Z. Sea use rights planning for floating offshore wind

- power development in the UK [J]. *Wind energy*, 2022(12): 44-51. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2022.12.013.
- [8] 陈灏, 孙省利, 张才学, 等. 广东省实施海洋牧场与海上风电融合发展的可行性分析 [J]. *海洋通报*, 2022, 41(2): 208-214. DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2022.02.010.
- CHEN H, SUN X L, ZHANG C X, et al. Feasibility analysis on the integrated development of marine ranch and offshore wind power in Guangdong province [J]. *Marine science bulletin*, 2022, 41(2): 208-214. DOI: 10.11840/j.issn.1001-6392.2022.02.010.
- [9] 刘展志, 王诗超, 郝为瀚, 等. 大规模海上风电集中送出建设模式研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(1): 13-20. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.002.
- LIU Z Z, WANG S C, HAO W H, et al. Research on construction mode of large-scale offshore wind power centralized transmission [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(1): 13-20. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.002.
- [10] 王晴勤, 许婷芳. 近海深水海上风电场的选址 [J]. *船舶工程*, 2020, 42(增刊1): 594-596, 604. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2020.S1.138.
- WANG Q Q, XU T F. Site selection of offshore deep-water offshore wind farms [J]. *Ship engineering*, 2020, 42(Suppl.1): 594-596, 604. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2020.S1.138.
- [11] 廖静. 广东首个海上风电场: 打造海上风电工程典范 [J]. *海洋与渔业*, 2018(5): 28-31. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4046.2018.05.012.
- LIAO J. Guangdong's first offshore wind farm: creating a model for offshore wind power engineering [J]. *Ocean and fishery*, 2018(5): 28-31. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4046.2018.05.012.
- [12] 季则舟. 基于与环境相协调的韧性海岸工程建设策略 [J]. *海洋与湖沼*, 2022, 53(4): 830-837. DOI: 10.11693/hyh20211200344.
- JI Z Z. Construction strategies for resilience coastal engineering in harmony with environment [J]. *Oceanologia et limnologia sinica*, 2022, 53(4): 830-837. DOI: 10.11693/hyh20211200344.
- [13] 刘梦瑶. 新发展理念下连云港绿色港口的建设发展研究 [J]. *北方经贸*, 2023(3): 107-110. DOI: 10.3969/j.issn.1005-913X.2023.3.bfjm202303026.
- LIU M Y. Research on the construction and development of Lianyungang green port under the new development concept [J]. *Northern economy and trade*, 2023(3): 107-110. DOI: 10.3969/j.issn.1005-913X.2023.3.bfjm202303026.
- [14] 刘晓明, 谭祖祝, 袁振华, 等. 柔性直流接入海上风电并网选址综合优化 [J]. *发电技术*, 2022, 43(6): 892-900. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22011.
- LIU X M, TAN Z K, YUAN Z H, et al. Comprehensive optimization of access point selection for offshore wind farm integrated with voltage source converter high voltage direct current [J]. *Power generation technology*, 2022, 43(6): 892-900. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22011.
- [15] 岳莹, 王智科. 分布式风电在绿色港口建设中的应用 [J]. *港口科技*, 2019(4): 33-38. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6826.2019.04.009.
- YUE Y, WANG Z K. Application of distributed wind power in green port construction [J]. *Port science & technology*, 2019(4): 33-38. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6826.2019.04.009.
- [16] 刘新苗, 卢洵, 娄源媛, 等. 基于时序运行模拟的风火打捆最优容量配比整定 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(21): 53-62. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210116.
- LIU X M, LU X, LOU Y Y, et al. Optimal setting of wind-thermal-bundled capacity ratio based on chronological operation simulation [J]. *Power system protection and control*, 2021, 49(21): 53-62. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210116.
- [17] 周玲娟. 游艇基地防波堤平面研究 [J]. *珠江水运*, 2017(11): 92-94. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2017.11.036.
- ZHOU L J. Study on the breakwater plan of yacht base [J]. *Pearl River water transport*, 2017(11): 92-94. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2017.11.036.
- [18] 周川, 蔡彦枫, 王俊, 等. 基于CFO的海上风电场微观选址优化算法研究 [J]. *可再生能源*, 2021, 39(1): 67-73. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2021.01.012.
- ZHOU C, CAI Y F, WANG J, et al. Study on the optimization algorithm of wind farm micro-siting based on CFO in offshore [J]. *Renewable energy resources*, 2021, 39(1): 67-73. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2021.01.012.
- [19] 魏坤, 刘洋, 周立钦, 等. 交能融合在高速公路服务区建设中的应用研究 [J]. *交通节能与环保*, 2023, 19(1): 86-90. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2023.01.020.
- WEI K, LIU Y, ZHOU L Q, et al. Research on the application of traffic energy integration in the construction of expressway service areas [J]. *Transport energy conservation & environmental*, 2023, 19(1): 86-90. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6478.2023.01.020.
- [20] 许莉, 李锋, 彭洪兵. 中国海上风电发展与环境问题研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(增刊1): 135-138. DOI: 10.19474/j.cnki.10-1156/f.001196.
- XU L, LI F, PENG H B. Development of offshore wind power and its environmental problems in China [J]. *China population, resources and environment*, 2015, 25(Suppl.1): 135-138. DOI: 10.19474/j.cnki.10-1156/f.001196.

作者简介:



王晴勤

王晴勤(第一作者, 通信作者)

1982-, 男, 高级工程师, 注册城市规划师, 城市规划专业, 主要从事海上风电规划与电厂总图规划设计工作(e-mail) 81772216@qq.com。

(编辑 叶筠英)