

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.024

广东某海上风电场波浪能资源分析

周川¹, 黄亚珏²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 2. 珠江流域水资源保护局, 广州 510611)

摘要: 海上风电场场址海域风资源丰富, 因此也伴随着丰富的波浪能资源。以广东省某海上风电场为例, 采用第三代海浪数值模式 WAVEWATCH-III 模拟该海域近十五年波浪场资料。综合考虑本海域的波浪能密度、波浪能级频率、波浪能资源稳定性等方面对波浪能资源进行分析。为波浪能资源的开发与利用提供依据。

关键词: 海上风电场; WAVEWATCH-III; 波浪能资源

中图分类号: TM619

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)04-0119-04

Assessment of Wave Energy Resources in an Offshore Wind Farm of Guangdong

ZHOU Chuan¹, HUANG Yajue²

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

2. Pearl River Water Resources Protection Bureau, Guangzhou 510611, China)

Abstract: Offshore wind farm is abundant of wind resources, which generally results in rich wave energy resources. The third-generation wave model WAVEWATCH-III was used to simulate the wave field data over last fifteen years in an offshore wind farm in Guangdong province. In order to decide the feasibility of the development and utilization of wave energy resources, the wave energy density, frequency of wave energy rank and stability of wave energy density were analyzed by numerical modelling result.

Key words: offshore wind farm; WAVEWATCH-III; wave energy resources

随着资源危机的日益加剧, 可再生能源作为替代能源的重要性也日益彰显。波浪能是一种具有高能量密度的可再生能源, 是海洋中分布最广、品质较好的能量, 可通过较小的装置实现其利用。世界各海洋大国都十分重视波浪能的研究, 据英国碳信托投资公司估算, 英国实用离岸波浪能每年为 55 TWh, 占当前所需能源 14%, 美国电能所评估美国切实可行的波浪能为每年 255 TWh, 占当前所需能源 6%。

自 20 世纪 70 年代, 很多沿海工业化国家陆续启动了对波浪能的研究开发项目, 但大多数仍处于研发阶段。近年来, 很多国家关于波浪能的研发工

作都呈现了加快发展的趋势, 如英国 Islay 岸基式波能发电站已并入英国电网, 可满足 500 户家庭的用电需求。

为有效利用波浪能, 在波浪能源利用的研究过程中, 首先要对所研究海域的可利用波浪能资源进行有效可靠的评估。目前国内外波浪能评估方法主要分为两类: 一是采用实测波浪数据进行计算评价, 二是应用波浪数值模式后报的波浪数据进行估算与评价。由于我国长期波浪实测站点的设置比较少, 且大都位于近岸或近海岛处, 在实际工作中往往无法满足波浪能评估的要求。因此波浪数值模式后报的方法在波浪能资源评估中得到越来越多的应用。

1 资料模拟

WAVEWATCH(III) (后简写成 WW3) 模式是由美国 NOAA/NCEP 环境模拟中心海洋模拟小组开发的一个全谱空间的第三代海浪模式。研究表明

收稿日期: 2016-02-23

基金项目: 中国能建广东院科技项目: 波浪能发电技术应用研究 (EV00951W)

作者简介: 周川(1986), 男, 江苏徐州人, 工程师, 硕士, 主要从事水文学及水资源的工作 (e-mail) zhch8691@163.com。

该模式对我国南海海域的波浪场具有较好的模拟能力^[1,2]。

本文所研究的海上风电场离岸约 25 km, 场址范围内水深约 20~30 m, 海域周围缺少波浪长期观测资料。本文利用 WW3 模拟该海域 2000-2014 年近 15 年的波浪场数据, 并利用该海域短期的波浪实测资料进行验证, 分析该海域的波浪能资源。

收集该海域 2015 年 6 月 1 日至 2015 年 6 月 30 日一个月的实测波浪观测资料。波浪观测采用国际上先进的波浪骑士浮标系统, 测波点位于本文所研究的海上风电场范围内, 测波点水深约 25 m。

将实测波浪观测资料与同期模拟波浪数值资料进行对比(图 1)。由比较可知, WW3 的模拟数值与所在海域的实测波浪数值较为接近, 可以反映实测波浪的变化过程。

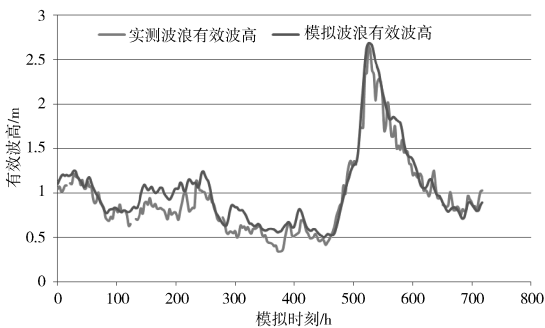


图 1 实测波浪有效波高与模拟波浪有效波高

Fig. 1 Comparison between measured wave height and simulation wave height

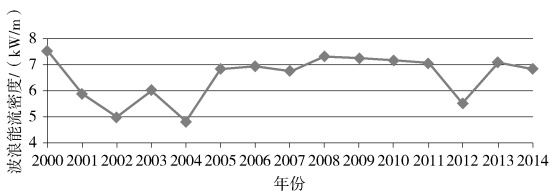


图 2 近 15 年该海上风电场海域各年平均波浪能流密度

Fig. 2 The annual average wave energy density of the past fifteen years

2 波浪能资源评估

2.1 波浪能密度评估

本文参考美国 EPRI (Electric Power Research Institute) 波浪能资源评估的算法^[3], 公式如下:

$$P_w \approx 0.42 \times H_s^2 \times T_p \text{ 或 } P_w \approx 0.5 \times H_s^2 \times \bar{T} \quad (1)$$

式中: P_w 为波浪能流密度; H_s 为有效波高(即 1/3

大波平均波高); T_p 为谱峰周期; \bar{T} 为平均周期。

根据公式(1)计算本海区多年波浪能流密度(图 2)。由计算可知, 近十五年来该海上风电海域多年平均波能密度为 6.53 kW/m, 各年平均波能密度最低值出现在 2004 年为 4.82 kW/m, 各年平均波能密度最高值出现在 2000 年为 7.51 kW/m。各年平均波能密度变化不大。

2.2 波浪能趋势性分析

采用坎德尔(Kendall)秩次相关法, 检验该海域各年波浪能密度是否有逐年变化趋势。

坎德尔秩次相关法原理如下^[4]: 对序列 $X_1, X_2 \dots X_n$, 先确定所有对偶值 $(X_i, X_j, j > i)$ 中的 $(X_i < X_j)$ 的出现个数(设为 p)。顺序的 (i, j) 子集是: $(i=1, j=2, 3, 4 \dots n), (i=2, j=3, 4, 5 \dots n) \dots (i=n-1, j=n)$ 。如果按顺序前进的值全部大于前一个值, 则认为序列有上升趋势, p 为 $(n-1) + (n-2) + \dots + 1$, 其总和为 $(n-1)n/2$ 。如果序列全部倒过来, 则 $p=0$, 为下降趋势。由此可知, 对无趋势的序列, p 的数学期望 $E(p) = n(n-1)/4$ 。

此检验的统计量:

$$U = \frac{\tau}{[V_{ar}(\tau)]^{1/2}} \quad (2)$$

式中: $\tau = \frac{4p}{n(n-1)} - 1$; $V_{ar}(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)}$ 。

当 n 增加, U 很快收敛于标准化正态分布。原假设为无趋势。当给定显著水平 α 后, 若 $|U| < U_{\alpha/2}$, 则接受原假设, 即趋势性不明显, 若 $|U| > U_{\alpha/2}$ 则拒绝原假设, 即趋势性显著。

给定显著水平 $\alpha=0.05$, 则 $U_{\alpha/2}=1.96$ 。根据 2000-2014 年各年波浪能密度计算检验统计量, 得 $|U|=0.84 < U_{\alpha/2}$ 。由此可见该海域近 15 年内波浪能密度无增大或减小的趋势。

2.3 波浪能频级分析

目前波浪能资源的等级划分尚无统一的标准, 本文参考 ZHENG 等提出的全球海域波浪能资源等级区划标准^[5]对本工程海域的波浪能进行频级分析, 见表 1。

由分析可知, 本海域多年平均波能密度为 6.53 kW/m, 根据全球波能资源等级区划标准, 本区域为波浪能资源较为富集区。

多年平均情况下, 本海域波能密度小于

1 kW/m的频率为 14.1%，波能密度大于 15 km/m 的频率为 9.6%。波能密度为 1~6 kW/m 的频率为 50.4%。另外波能密度区间为 6~15 kW/m 的频率为 25.9%。

表 1 研究海域各等级波能密度出现频率

Tab. 1 Each grade frequency of the wave energy density %

年份	波浪能密度出现频率			
	$P_w < 1$	$1 < P_w < 6$	$6 < P_w < 15$	$P_w > 15$
2000	13.0	47.6	27.6	11.9
2001	18.3	48.0	24.7	8.9
2002	14.5	59.7	19.9	5.9
2003	16.2	50.6	26.0	7.2
2004	17.6	53.8	23.9	4.7
2005	13.8	52.6	24.1	9.4
2006	15.4	49.3	21.6	13.7
2007	18.4	41.9	30.1	9.7
2008	14.0	46.1	25.4	14.5
2009	12.1	44.3	32.9	10.7
2010	9.6	53.8	23.3	13.3
2011	16.3	42.9	30.3	10.5
2012	10.7	55.9	27.8	5.6
2013	9.8	53.7	26.7	9.9
2014	11.5	56.3	24.5	7.8
平均	14.1	50.4	25.9	9.6

考虑当波能密度大于 2 kW/m 时为波浪能资源可有效利用的时间, 当波能密度大于 20 kW/m 时为波能密度富集时间。因此将波能密度大于 2 kW/m 和大于 20 kW/m, 分别命名为可用度频率和富集度频率^[6]。由计算可知, 本工程海域波浪能资源可用度频率为 69.3%, 富集度频率为 5%。可用度频率较高。

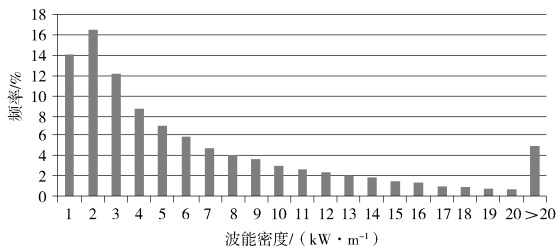


图 3 多年平均情况下各等级波能密度出现频率

Fig. 3 Each grade frequency of annual average wave energy density

2.4 波浪能资源稳定性分析

对波浪能的评价除应考虑波浪能的资源的丰富

程度, 还应关注其稳定性。稳定的波浪能资源更具有利用价值。统计本工程海域近十五年来各月平均波能密度, 如图 4 所示。

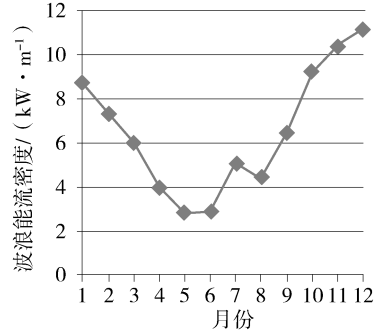


图 4 风电场海域各月波能密度变化

Fig. 4 Wave energy density of each month

本海上风电场海域波浪能密度年内变化较大, 10 月至次年 2 月份波能密度较大, 3 月至 9 月风功率密度最小。12 月份平均波能密度最大为 11.18 kW/m, 5 月份平均波能密度最小为 2.83 kW/m, 最大月波能密度与最小月波能密度的比值为 3.95。差别较大。

Andrew、郑崇伟等^[7]提出, 在海浪发电选址的评估中必须考虑数据的离散程度, 即计算能流密度的变差系数, 变差系数越小, 则能流密度的稳定性越好。

变差系数的具体计算方法如下:

$$C_v = \frac{S}{\bar{x}} \quad (3)$$

式中: C_v 为变差系数; \bar{x} 为均值; S 为标准差。

利用式(3)计算本工程海域各月变差系数如表 2。由计算结果可知本工程海域 9 月份波能密度变差系数最大为 2.91, 该月份波能密度稳定性最差; 12 月份波能密度变差系数最小为 0.6, 该月份波能密度稳定性最好。

表 2 该海域各月份波能密度变差系数

Tab. 2 Wave energy coefficient of variation for each month

月份	1	2	3	4
C_v	0.69	0.84	0.86	1.41
月份	5	6	7	8
C_v	1.49	0.95	2.86	2.48
月份	9	10	11	12
C_v	2.91	1.26	0.71	0.60

本工程海域7、8、9三个月份波能密度变差系数明显较其他月份大，主要是因为该海域在7、8、9三个月份易受台风影响。在台风影响期间，该海域会伴随较大的风浪过程，出现较高的波能密度。而在不受台风影响期间，7、8、9月三个月份波高较小，波能密度较低。因此该工程海域在7、8、9三个月份的波能密度最不稳定。

该海域在10月份至次年2月份波能密度变差系数较其他月份小，波能密度稳定性较好，而这些月份也是全年波能密度较大的月份，是波浪能资源最佳的利用月份。

3 结论

1) WW3模式对我国南海海域波浪场具有较好的模拟效果，当评估海域缺少长年波浪观测资料时，可借助于该模式对研究海域进行波浪能资源评估。

2) 海上风电场场址通常具有丰富的风能资源，因此也往往伴随着较为丰富的波浪能。在海上风电场海域研究风能与波浪能的综合利用，不仅可以实现对海洋的集中利用，也可以为开发者节省建设及输电投资费用。

3) 本文通过分析年平均波能密度、波浪能频级及波浪能资源稳定性等因素对研究海域的波浪能资源进行评价。经计算，本海上风电场海域属于波能较丰富的区域，可利用频度高，波浪能资源较稳定，具有较好的波浪能开发价值。其中每年10月份至次年2月份是该海域波浪能资源的最佳利用时间。

参考文献:

[1] 郑崇伟, 苏勤 刘铁军. 1988—2010年中国海域波浪能资源模拟及优势区域划分 [J]. 海洋学报, 2013, 35(3): 104-111.

ZHENG C W, SU Q, LIU T J. Wave energy resources assessment area evaluation the China sea from 1988 to 2010 [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(3), 104-111.

[2] 郑崇伟, 周林. 近10年南海波候特征分析及波浪能研究 [J]. 太阳能学报, 2012, 33(8): 1349-1356.

ZHENG C W, ZHOU L. Wave climate and wave energy analysis of the south China sea in recent 10 years [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2012, 33(8): 1349-1356.

[3] 郑崇伟, 李训强. 基于WAVEWATCH-III模式的近22年中国海波浪能资源评估 [J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(11): 005-012.

ZHENG C W, LI X Q. Wave energy resources assessment in the China sea during the last 22 years by using WAVEWATCH - III wave model [J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(11): 5-12.

[4] 张丽. 疏勒河流域降水分布规律及变化趋势分析 [J]. 甘肃水利水电技术, 2015, 51(7): 1-4, 21.

ZHANG L. Rainfall distributing disciplinarian and variation trend in the Shule river valley [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2015, 51(7): 1-4, 21.

[5] ZHENG C W, ZHUANG H, LI X, et al. Wind energy and wave resources assessment in the east China sea and south China sea [J]. Sci. China Tech. Sci., 2012, 55(1): 163-173.

[6] 万勇, 张杰, 孟俊敏, 等. 基于ERA-Interim再分析数据的OE-W01区块波浪能资源评估 [J]. 资源科学, 2014, 36(6): 1278-1287.

WAN Y, ZHANG J, MENG J M, et al. Assessment of wave energy resources for the OE-W01 Area based on ERA-Interim reanalysis data [J]. Resources Science, 2014, 36(6): 1278-1287.

[7] 郑崇伟. 近45年全球海域波浪能资源研究及等级区划 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2013, 8(1): 18-24.

ZHENG C W. Global oceanic wave energy resources reassessment over the past 45 years based on ERA-40 wave reanalysis [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2013, 8(1): 18-24.

(责任编辑 高春萌)

广 告

- 中英(广东)CCUS产业促进与学术交流中心 封二
- 500 kV 港城至东海岛送电线路工程 封三
- 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司 封四