

# 我国海洋能发电装置的测试和评价

王项南<sup>1</sup>, 贾宁<sup>1</sup>, 夏海南<sup>1</sup>, 张原飞<sup>1</sup>, 郭毅<sup>1</sup>, 王贞远<sup>2</sup>, 俞彦辉<sup>2</sup>

(1. 国家海洋技术中心 天津 300112;

2. 天津大学 天津 300072)

**摘要:**发展海洋能发电装置测试和评价技术有助于推动相关技术成果转化,促进我国海洋能的开发利用。文章概述国内外海洋能发电装置及其测试和评价技术进展;重点分析海洋能(潮流能和波浪能)发电装置测试和评价的主要内容,包括功率特性、电能质量特性及其综合测试系统;分别选取潮流能和波浪能发电装置案例,按相应方法和内容进行现场测试和评价。

**关键词:**海洋能;发电装置;装备制造;电能供应;海试

中图分类号:P743;TM619

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2018)06-0087-04

## Testing and Evaluation of China's Marine Energy Generating Devices

WANG Xiangnan<sup>1</sup>, JIA Ning<sup>1</sup>, XIA Hainan<sup>1</sup>, ZHANG Yuanfei<sup>1</sup>,  
GUO Yi<sup>1</sup>, WANG Zhenyuan<sup>2</sup>, YU Yanhui<sup>2</sup>

(1. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China;

2. Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The development of testing and evaluation technologies for marine energy power generating devices will help promote the transformation of relevant technological achievements and promote the development and utilization of marine energy in China. The paper outlined the development of marine energy power generating devices and their testing and evaluation technologies at home and abroad, and focused on the analysis of the main contents of testing and evaluation of marine energy (tidal current energy and wave energy) power generating devices, including power characteristics, power quality characteristics, and comprehensive test systems. The paper also selected cases of tidal current energy and wave energy generating devices, and carried out testing and evaluation in the sea according to the corresponding method and content.

**Key words:** Marine energy, Power generating devices, Equipment manufacturing, Power supply, Sea trial

收稿日期:2017-11-09;修订日期:2018-05-29

基金项目:海洋可再生能源专项项目(GHME2014ZC01、GHME2017ZC01、GHME2016ZC01)。

作者简介:王项南,研究员,研究方向为海洋能开发利用和海洋环境监测

通信作者:贾宁,工程师,硕士,研究方向为海洋能开发利用

## 1 国内外海洋能发电装置及其测试和评价技术进展

受石油等传统能源日益紧缺和全球气候变化的影响,低碳和节能的可再生能源成为世界能源发展的主题。海洋能是绿色、清洁和储量巨大的可再生能源,世界各海洋国家纷纷制定海洋能战略计划和发展路线,推进海洋能的开发利用。

随着英国和美国等海洋强国持续加大对海洋能发电技术研发和示范应用的资金投入和政策支持力度,大型跨国能源和制造业企业进军海洋能领域,取得一系列重要进展。潮汐能发电技术已实现产业化和市场化,世界最大的潮汐能电站——韩国始华湖潮汐发电站的装机容量达 254 MW;装机容量为 398 MW 的英国彭特兰湾潮流能发电场是迄今世界最大的潮流能开发计划,一期装机 6 MW 已并网发电;多个波浪能发电装置已多年示范运行,如芬兰“Penguin I”(1 MW)波浪能发电装置正于英国 Wave Hub 试验场示范运行;温差能发电及其综合开发利用即将开展兆瓦级工程建设<sup>[1]</sup>。

海洋能发电装置测试场用于测试即将应用于商业的海洋能发电装置及其相关技术<sup>[2]</sup>,在海洋能产业化进程中受到越来越多的关注。全球目前有英国的欧洲海洋能源中心(EMEC)、加拿大的 Fundy 海洋能源中心(FORCE)和丹麦的 Folkecenter 海洋能测试场等 10 余家体系成熟、功能完善和服务全面的海洋能测试场。正在示范运行或已并网发电的海洋能发电装置在商业化应用前都进行了大规模和长时间的实海况并网试验。

我国海洋能开发利用工作起步较早,1980 年建成的浙江省温岭市江夏潮汐试验电站现装机容量为 4 100 kW,是我国最大的潮汐电站<sup>[3]</sup>。近年来,在国家科技计划和专项资金的支持下,我国海洋能的基础科学研究、关键技术研发、工程示范应用和公共支撑服务体系等全方位发展,研发多项潮流能和波浪能发电试验装置,主要海洋能发电技术已全面进入海试阶段:3.4 MW 模块化大型潮流能发电系统的首套 1 MW 机组实现下海发电;100 kW 鹰式波浪能发电装置和 60 kW 半直驱式水平轴潮流能发电装置累计发电量均超过 3 万 kW·h;研制

小型化温差能发电原理样机并开展海试,以解决海洋观测平台的供电问题<sup>[4]</sup>。

我国先后开展海洋能发电装置测试和评价方法研究,陆续建立多个海洋能发电装置的实验室测试平台和现场测试平台,研制海洋能发电装置综合测试和评价系统工程样机,已具备在实验室和现场环境下对海洋能发电装置进行测试和评价的能力。

## 2 海洋能发电装置的测试和评价

海洋能发电装置的测试和评价是判断海洋能发电装置优劣的重要方法,是促进海洋能发电技术成果转化的关键环节。在海洋能发电技术商业化应用前,须对发电装置模型和原型机进行大规模和长时间的实海况试验,以便对其性能进行评价,从而降低投资风险<sup>[5-6]</sup>。

海洋能发电装置的功率特性是衡量其发电能力的重要指标,其中潮流能发电装置的功率特性指标主要包括功率特性曲线、转换效率和年发电量,波浪能发电装置的功率特性指标主要包括功率特性矩阵、转换效率和年发电量。此外,由于海洋能发电装置的发展方向是使输出的电能并入当地电网,还须测试海洋能发电装置输出电能的质量特性,以判断其是否满足当地需求;根据国家电网和电力行业的相关标准,电能质量特性指标主要包括电压偏差、频率偏差、三相电压不平衡度、电压波动、电网谐波和电压闪变等。

### 2.1 潮流能发电装置的功率特性

(1)功率特性曲线是以特征流速为横坐标、以输出功率为纵坐标而绘制的曲线。

(2)转换效率的计算公式为:

$$C_p = \sum_{i=1}^{N_b} [f_i \cdot C_{pi}]$$

式中:  $f_i$  是流速在不同区间内的分布频率;  $C_{pi}$  是流速区间  $i$  内潮流能发电装置的输出功率系数;  $N_b$  是区间的个数。

(3)年发电量是在 1 a(8 760 h)的时间内,潮流能发电装置所能产生的电能,计算公式为:

$$A = 8\ 760 \cdot A_v \cdot \sum_{i=1}^{N_b} [f_i \cdot P_i]$$

式中:  $A_v$  是发电装置的可利用率;  $P_i$  是不同流速区间内潮流能发电装置的输出功率,单位为 kW。

## 2.2 波浪能发电装置的功率特性

(1)功率特性矩阵是以周期为  $x$  轴、以有效波高为  $y$  轴、以输出功率为  $z$  轴而生成的矩阵。

(2)转换效率采用波浪能发电装置的实际捕获长度和理论最大捕获长度为指标,计算公式为:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^{N_b} g_i \cdot L_i}{L} \cdot 100\%$$

式中:  $g_i$  是波浪能发电装置的实际捕获长度在各区间内的出现频率;  $L_i$  是不同区间内的捕获长度,单位为 m;  $L$  是不同类型波浪能发电装置的理论最大捕获长度,单位为 m。

(3)年发电量的计算公式为:

$$A = 8\,760 \cdot A_v \cdot \sum_{i=1}^{N_b} [g_i \cdot L_i \cdot J_i]$$

$$A_v = \frac{T_w}{T} \cdot 100\%$$

式中:  $J_i$  是不同区间的波浪能通量,单位为 W/m;  $T_w$  是波浪能发电装置无故障的工作时间,单位为 h;  $T$  是波浪能发电装置的测试时间,单位为 h。

## 2.3 输出电能的质量特性

波浪能和潮流能发电装置的电能质量特性的测试方法相同,都是在发电装置的电能输出终端,采用电能质量分析仪对相关参数进行测试。电能质量分析仪可提供非常精确的数据,包括电压、电流、功率和电度的真实有效值以及三相电压、电网谐波、电压不平衡度、电压及其偏差、电压波动和闪变、频率及其偏差、功率、功率因数等;还具有丰富的 I/O 功能、全面记录功能以及高级电能质量测量和标准验证功能,即开即用,也可通过定制满足用户的独特需求。电能质量分析仪可代替大量变送器、传统仪表和控制电路,还可通过多种工业标准通信通道和协议与 ION 软件或其他能量管理、SCADA、自动化和计费系统相连接。

## 2.4 综合测试系统

在海洋可再生能源专项资金的支持下,为开展实海况条件下的综合测试关键技术研发,满足发电效率和供电质量等现场测试的需要,我国研建了海洋能发电装置综合测试系统工程样机。该工程样机的额定功率为 500 kW、额定电压为 0.4 kV、额定功率因数为 0.8,整套系统集成安装在约 12 m 的标

准集装箱内,易于移动、布放、安装、调试、维护和回收,并可满足对测试现场恶劣环境条件的安全防护要求,主要包括电能质量监控模块、负载调节模块和短路模拟模块。其是我国首套波浪能和潮流能独立电力系统综合测试工程样机,可对功率不大于 500 kW、电压不大于 400 V 的离网型波浪能和潮流能发电装置进行功率特性、电能质量特性和短路保护特性等的综合测试。

## 3 实际应用

### 3.1 潮流能发电装置的现场测试和评价

被测装置是 LHD 模块化大型潮流能发电机组,现已安装 2 台 200 kW 机组和 2 台 300 kW 机组,位于浙江省舟山市岱山县秀山乡水道,测试时间为 2016 年 11 月 4—30 日。

以 200 kW 潮流能发电装置为例,其功率特性曲线如图 1 所示。

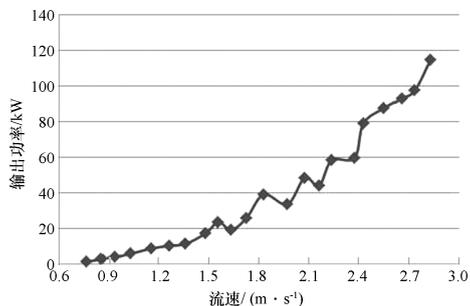


图 1 200 kW 潮流能发电装置的功率特性曲线

由图 1 可以看出,输出功率随流速的增大而呈上升趋势。在 0.7~2.8 m/s 的流速区间内,装置转换效率的变化区间为 12.0%~27.7%;当流速超过 0.9 m/s 时,装置转换效率均大于 18%;当流速为 1.8 m/s 时,装置转换效率最大,为 27.7%。经计算,200 kW 潮流能发电装置的年发电量约为 517 882.6 kW · h。

在电能质量特性方面,对装置在 11 月 15 日大潮退潮时的发电情况为代表进行数据分析,其电压偏差、频率偏差、电网谐波、电压不平衡度和电压波动均满足国家电能质量相关标准;电压长闪变超标,可从逆变器的容量配置、装置切入和切出电网的条件以及增设无功调节设备等方面优化升级。

### 3.2 波浪能发电装置的现场测试和评价

被测装置是鹰式装置“万山”号,装机容量近300 kW,在100 kW样机的基础上优化升级,布放于广东省珠海市大万山海域,测试时间为2017年4月21日至5月24日。

该装置的功率特性矩阵散点分布如图2所示。

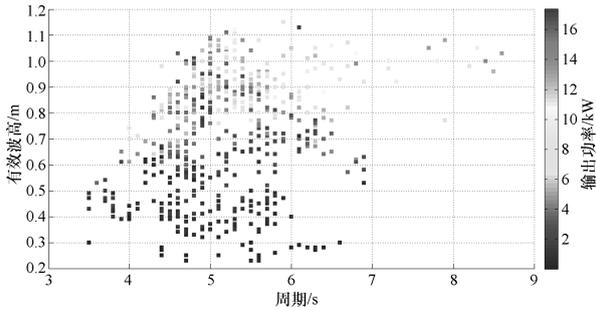


图2 “万山”号的功率特性矩阵散点分布

由图2可以看出,在整体分布上,“万山”号功率特性的现场测试数据在周期为3.5~6 s、有效波高小于1 m的区间范围内较多。装置在测试期间的转换效率变化范围为0.05%~31.64%,从能量捕获端到电能输出端的总体转换效率为11.77%。经计算,“万山”号波浪能发电装置的年发电量约为40 171 kW·h。

在电能质量特性方面,逆变器于5月21日16时49分至5月22日16时59分的并网功率较连续,选取这一区间的电能质量数据进行分析,装置的频率偏差、电压不平衡度和电网谐波均符合国家电能质量标准要求,而电压偏差、电压波动和电压闪变有不符合标准的情况。

### 4 结语

近年来,在我国政府的大力支持下,我国海洋能发电技术在基础研究、装置研发和示范应用等领域取得诸多进展。海洋能发电装置形式多样和工作原理不同,对其测试和评价工作提出更高的要求。海洋能发电装置的测试和评价为技术创新和工程设计提供技术支撑,进一步促进海洋能发电技术的产业化,从而逐步实现为边远海岛等目标领域提供电能。目前我国海洋能发电装置的测试和评价技术正通过不断创新逐渐与国际先进水平接轨,面对越来越多的海洋能发电装置进入海试阶段,未来仍须继续完善测试和评价能力,逐步建立测试和评价体系,推动我国海洋能开发利用装备制造业成长为对经济社会发展具有重大引领作用的战略性新兴产业。

### 参考文献

- [1] 麻常雷,夏登文,王萌,等.国际海洋能技术进展综述[J].海洋技术学报,2017,36(4):70-75.
- [2] 马哲,王继业.国外海洋能发电测试场发展情况分析及其借鉴研究[J].海洋开发与管理,2017,34(1):67-70.
- [3] 史宏达,王传崑.我国海洋能技术的进展与展望[J].太阳能,2017(3):30-37.
- [4] 国家海洋技术中心.中国海洋能技术进展2016[M].北京:海洋出版社,2016.
- [5] 王项南,夏海南,李雪临,等.海洋能发电装备现场检测技术研究[J].海洋技术学报,2014,33(4):112-116.
- [6] AMON E, BREKKEN T K A, JOUANNE A V. A power analysis and data acquisition system for ocean wave energy testing [J]. Renewable Energy, 2011, 36: 1922-1930.