

波浪能发电装置现场测试与评价分析

王项南¹, 夏海南¹, 张原飞¹, 俞彦辉^{1,2}, 郭毅¹, 贾宁¹

(1. 国家海洋技术中心, 天津 300112; 2. 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘 要: 研究国际电工委员会发布的波浪能发电装置功率特性现场测试规程中的测试方法, 借鉴中国国内风力发电机组电能质量现场测试方法, 根据波浪能发电装置的研发阶段, 确定中国对波浪能发电装置的现场测试指标主要有功率特性矩阵、转换效率、电压偏差、频率偏差等指标, 并提出针对这些指标的现场测试方法。应用提出的波浪能发电装置功率特性和电能质量特性现场测试方法, 针对中国自主研发的“万山号”波浪能发电装置及布放海域, 制定现场测试与评价方案, 搭建现场测试平台, 开展现场测试工作。通过对现场测试数据处理与分析, 对“万山号”波浪能发电装置在其测试海域及其测试期间的功率特性和电能质量特性指标进行分析与评价。

关键词: 波浪能; 波浪能发电装置; 评估方法; 功率特性; 电能质量特性

中图分类号: P743.2; TH17 **文献标志码:** A

0 引 言

中国于 2010 年设立海洋可再生能源专项资金, 支持波浪能发电装置的开发与利用。截止目前, 中国波浪能发电装置研发进展迅速, 一批波浪能发电装置均开展了实海况示范运行工作^[1-4]。在波浪能发电装置实海况示范运行的过程中, 功率特性和电能质量特性是衡量波浪能发电装置发电性能的重要指标^[5]。功率特性指标主要包括: 功率特性矩阵、转换效率、年发电量等; 电能质量特性指标主要包括: 电压偏差、频率偏差以及三项不平衡度等指标。对波浪能发电装置功率特性和电能质量特性进行测试与评价, 有利于波浪能发电装置研发水平的提升, 促进波浪能发电装置的产业化进程与商业化应用^[6]。国外对波浪能发电装置现场测试与评价工作起步较早。西班牙的 Bimep 波浪能测试场, 也对 OCEANTEC 公司等研发的波浪能发电装置在此开展过测试工作; 英国的欧洲海洋能中心 (European Marine Energy Centre) 自 2003 年建成以来, 先后有多个波浪能发电装置在此开展过测试工作, 该中心对波浪能发电装置现场测试的方法也开展了技术研究^[7]。中国在此领域内也开展了相关现场测试方法的研究与测试平台的

设计, 积累了一定前期技术基础, 开展了波浪能发电装置测试方法的研究, 并研建了相关测试系统^[8-9]。

本文在中国波浪能发电装置现场测试方法研究与测试系统研建的基础上, 针对中国波浪能发电装置现场测试需求, 在国内参考国际上该领域内的研究成果, 同时借鉴中国国内风力发电机组电能质量特性现场测试方法研究进展, 提出波浪能发电装置现场测试方法, 并应用于“万山号”波浪能发电装置的现场测试工作中。

1 评价方法

1.1 功率特性

波浪能发电装置的发电性能一般利用功率特性来衡量。当水深大于波长的一半时, 波浪的能通量可按式(1)计算, 波浪能发电装置输出的电功率可按式(2)计算, 利用式(3)计算出 n 个不同时间间隔内的捕获长度。通过对测试数据处理可对功率特性进行计算与分析。

$$J_n = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T \quad (1)$$

$$P_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_k i_k \times 10^{-3} \quad (2)$$

收稿日期: 2018-02-12

基金项目: 2016 年海洋可再生能源专项资金 (GHME2016ZC01); 国家重点研发计划 (2016YFF0202404); 2017 年海洋可再生能源专项资金 (GHME2017ZC01)

通信作者: 王项南 (1965—), 男, 学士、研究员, 主要从事海洋能开发利用方面的研究。notckj@vip.sina.com

$$L_n = \frac{P_n}{J_n} \quad (3)$$

式中, J_n ——在统计周期内的波浪能通量, W/m ;
 ρ ——测试海域的海水密度, kg/m^3 ; g ——重力加速度, m/s^2 ; H_s ——统计周期内的有效波高, m ; T ——统计周期内有效波高对应的波周期, s ; P_n ——统计周期波浪能发电装置输出的平均电功率, kW ; N ——统计周期内数据的数量; u_k ——某一瞬时电压的采样值, V ;
 i_k ——某一瞬时电流的采样值, A ; L_n ——不同时间间隔内的捕获长度, m 。

1.2 电能质量特性

电能质量特性是指导致用电设备故障或不能正常工作的电压、电流或频率的偏差,其内容包括频率偏差、电压偏差、电压波动与闪变、三相不平衡、谐波、电磁暂态及供电可靠性。按照国家电能质量相关标准,分析计算波浪能发电装置逆变器的电力输出参数,对照标准限值开展评价。相关标准规定如下:

1) GB 12325—2008《电能质量:供电电压偏差》中规定:20 kV 及以下电力系统,三相电压允许偏差为额定电压的 $\pm 7\%$ ^[10];

2) GB/T 15945—2008《电能质量:电力系统频率偏差》中规定:电力系统正常频率偏差允许值为 $\pm 0.2 \text{ Hz}$,当系统容量较小时,偏差值可放宽到 0.5 Hz ^[11];

3) GB/T 15543—2008《电能质量:三相允许不平衡度》中规定:电力系统公共连接点正常电压不平衡度允许值为 2% ,短时不得超过 4% ^[12];

4) GB/T 14549—1993《电能质量:公用电网谐波》中对谐波电压规定:电压总谐波畸变率允许值 5% ;奇次 4% ;偶次 2% ^[13];

5) GB 12326—2008《电能质量-电压允许波动和闪变》中规定:低压系统中,对于随机性不规则的电压波动限值为 3% 。以长时间闪变值作为闪变的限值,对于小于 110 kV 系统,闪变限值为 1% ^[14]。

2 现场测试

2.1 被测装置

目前鹰式装置“万山号”已优化升级为一台海上漂浮式多能互补平台,平台装机 300 kW ,波浪能液压发电机组总装机 240 kW ,光伏装机峰值功率近 60 kW 。“万山号”多能互补平台的能量转换系统中所有液压发电机组经整流后,汇入直流母线,直流母线可挂蓄电池组,最后逆变升压后提供用户使用。



图1 “万山号”波浪能发电装置

Fig. 1 Wanshan wave energy converter

2.2 测试海域

“万山号”波浪能发电装置于 2017 年 4 月 15 日布放在广东省大万山海域。该海域的水深约为 30 m ^[15],冬季东北浪向,常见浪高 $1.0\sim 3.0 \text{ m}$,常见周期 $4\sim 6 \text{ s}$;4~5 月份风浪较小,常见浪高 $0.3\sim 1.5 \text{ m}$,常见周期 $3\sim 5 \text{ s}$;夏季西南浪向,常见浪高 $0.5\sim 3.0 \text{ m}$,常见周期 $4\sim 6 \text{ s}$,多风暴和台风。

2.3 测量要素

2.3.1 波浪参数

波浪测量参数主要包括波高、波周期、波向等参数。波浪的测量位置应选择与波浪能发电装置所处水深地形条件相近、地形变化平坦、能通量一致的位置。波浪参数的测量依据 GB 12763.2—2016《海洋调查规范第 2 部分:海洋水文观测》的相关要求。

2.3.2 电力参数

电力测量参数主要有电压、电流、频率、有功功率、无功功率、视在功率、功率因数、中性线电流、谐波、膨胀/下降/中断/暂态过电压、浪涌电流、不平衡率和闪变等。电力参数的测量符合国家标准的相关要求。

2.4 测试方案

功率特性参数测量仪器选用高精度功率分析仪型号为 WT1800,配有 6 路电压、电流测量通道,满足 2 台发电机组同时测试。电能质量特性参数的测量仪器选用电能质量分析仪型号为 E6500,测量内容包括电压、电流、频率、功率、功率因数、中性线电流、谐波、浪涌电流、不平衡率和闪变等。波浪参数的测量采用波浪骑士。在波浪能发电装置的来浪方向,采集输入到波浪能发电装置能量捕获端的波浪能量。

2.4.1 电力参数测量

1) 功率参数测量:①在停机状态下,切断发电机与控制器和控制柜与直流母线的连接,保证电路处于无电状态。将电压传感器与电流传感器连接在直流柜的输

入端;②将电压传感器与电流传感器按照接线方式连接在功率分析仪上保证相序对应;③闭合发电机、控制柜和直流母线的断路器,接通功率分析仪的电源,开机检测显示画面是否正常,24条采集线路是否有信号输出;④校对好2台功率分析仪的时间,保证同步测试,启动机组开始调试功率分析仪,检测显示数据是否正常;⑤分别对4台发电机的功率进行测试,每分钟记录1个平均功率。

2)电能质量参数测量:①在停机状态下,切断直流母线与逆变器与逆变器与负载的连接,保证电路处于无电状态,将电压传感器与电流传感器连接在逆变器的输出端;

②将电压传感器与电流传感器按照接线方式连接在电能质量分析仪上,保证相序对应;③闭合直流母线、逆变器和负载的断路器,接通电能质量分析仪的电源,开机检测显示画面是否正常,6条采集线路是否有信号输出;④开启逆变器,开始调试电能质量分析仪,选择自动检测测试环境,包括接线方式、电压方向、电压相序、电流方向和电流相序是否正确,如有误接,按照提示在发电装置停机和切断逆变器与电网的连接的情况下改变接线;⑤当电能质量分析仪通过测试环境检测,即完成接线工作,可以开始电能质量的测试。当逆变器向负载供电时,开始记录数据,每分钟记录一次数据。

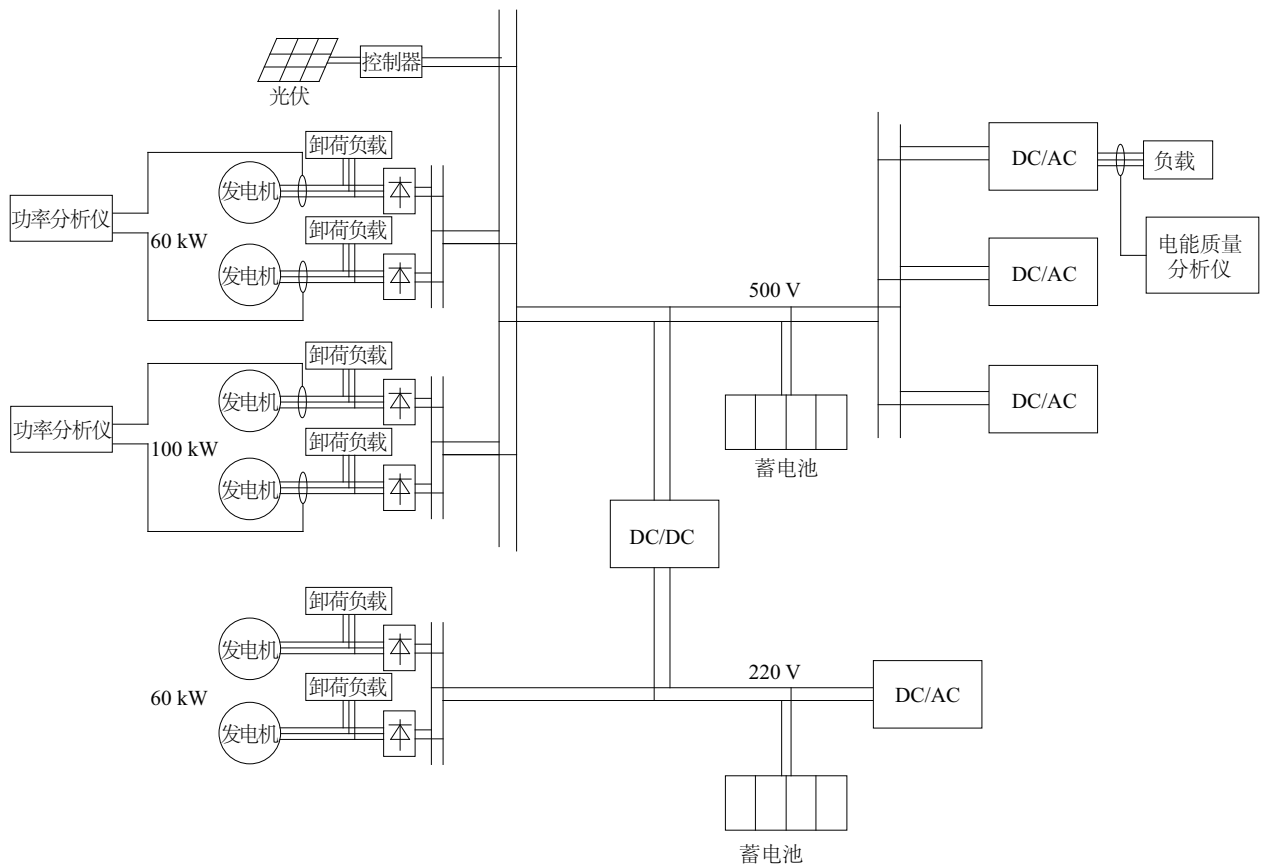


图2 电力参数测量位置

Fig. 2 Measurement site of electric parameters

2.4.2 波浪参数测量方案

波浪能发电装置布放海域的波浪条件,通过该海域2014~2015年的波浪观测数据与1992~2011年的波浪能资源数值模拟,分析4月份期间该海域长浪向及次长浪向、有效波高及平均波浪能的等值线分布。另外,鹰式装置“万山号”布放位置水深约30m,波浪为涌浪和以涌浪为主的混合浪,4月份主浪向为ESE,有效波高与波浪能分布趋于平缓,呈现由南向北递减的走向,无

明显变化。测试位置初步定于波浪能发电装置布放位置东南方向100~200m的区域内。

2.5 结果与分析

2017年4月21日~5月24日,对位于广东省珠海市大万山海域的“万山号”鹰式波浪能发电装置的并网逆变器开展电能质量特性现场测试工作,共计34d。电能质量分析仪的数据采样频率为1Hz,测试期间共计获取约290万组数据。选取5月21日16:49~22日16:59

的电力数据作为分析对象。数据处理时,同步波浪输入参数与电功率输出参数。经数据统计,本次测试的有效波高变化范围为 0.23~1.15 m;周期变化范围为 3.5~8.6 s;输出功率变化范围为 0.002~17.400 kW。

2.5.1 功率特性

1) 功率特性矩阵

功率特性矩阵的绘制参考国际电工委员会发布的测试规程^[6]。如图 3 所示,周期划分步长为 1 s,有效波高划分步长为 0.1 m,将在此区间范围内的输出功率值用不同颜色(彩图请下载 pdf 文档查阅)表现出来。通过功率特性矩阵散点图分析发现在本次测试期间,波浪的输入功率普遍偏小。

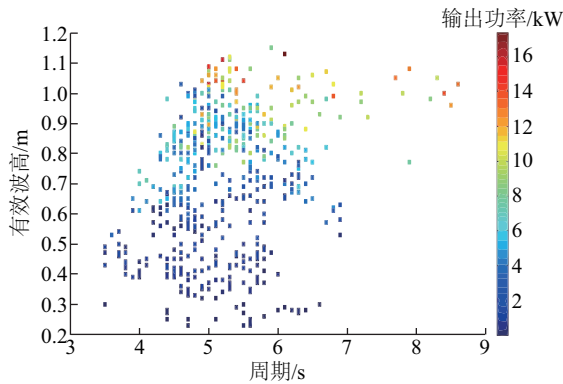


图3 功率特性矩阵

Fig. 3 Power matrix

2) 转换效率

波浪能发电装置在整个测试期间的转换效率,按式(10)和式(11)计算^[6]:

$$\bar{\eta} = \sum_{i=1}^n \eta_i f_i \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^n f_i = 1 \quad (11)$$

式中, $\bar{\eta}$ ——“万山号”总体转换效率; η_i ——每个区间的平均转换效率; f_i ——每个区间的出现频率, Hz。

“万山号”波浪能发电装置在测试期间的转换效率变化范围为 0.05%~31.64%。应用式(10)计算得出,“万山号”波浪能发电装置在测试期间、由能量捕获端到电力输出端的总体转换效率为 11.77%。

3) 年发电量

年发电量(annual energy production, AEP)是利用现场测试的数据,对波浪能发电装置在一年内所能发出的总电量进行估算^[6],年发电量是衡量波浪能发电装置经济性能的重要指标。

$$AEP = TA_v \sum_{i=1}^n L_i J_i f_i \quad (12)$$

式中, T ——整年时间,按 8760 h 计算; A_v ——装置无故障工作天数与运行总天数之比; L_i ——每个区间的捕获长度, m; J_i ——每个区间的能通量, kW/m; f_i ——每个区间的出现频率, Hz。

利用本次“万山号”波浪能发电装置功率特性的现场测试数据,应用式(12)对“万山号”波浪能发电装置的年发电量进行估算。设定 $A_v = 1$, 估算“万山号”波浪能发电装置的年发电量为 40171 kWh。

通过对功率特性矩阵图谱的分析发现,本次现场测试期间的波高和周期相对较小,且未处在“万山号”波浪能发电装置最佳输出的海况。因此,本文针对“万山号”波浪能发电装置功率特性的分析,仅为在其测试期间浪况条件下所得到的分析结果。

2.5.2 电能质量特性

1) 电压偏差

如图 4 所示,所测得的逆变器输出的三相电压中, a 相最大电压偏差超出 1.01%; b 相最大电压偏差超出 1.486%; c 相满足标准要求。在测试期间,并网逆变器 a 相、b 相电压偏差偏高, c 相电压偏差符合国家电能质量标准限值。

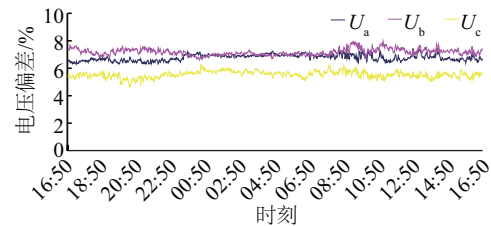


图4 电压偏差变化曲线

Fig. 4 Curve of voltage deviation

2) 频率偏差

如图 5 所示,所测得的频率无最大正偏差,最大负偏差为 -0.002 Hz,频率符合标准要求。在测试期间,频率偏差符合国家电能质量标准要求^[11]。

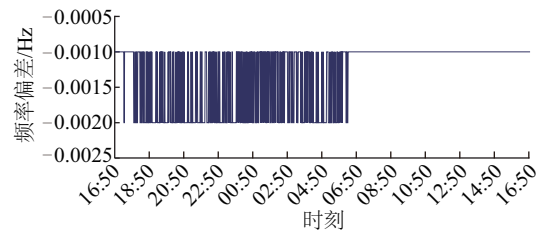


图5 频率偏差变化曲线

Fig. 5 Curve of frequency deviation

3) 不平衡度

如图 6 所示,所测得的电压不平衡度最大值为

1.51%,平均值为 0.94%,最小为 0.31%。电压不平衡度符合标准要求。在测试期间,有 29 天负序电压不平衡度符合国家电能质量标准要求^[12]。

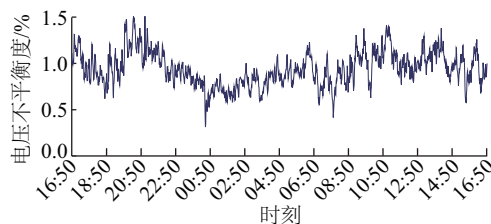


图6 电压不平衡度变化曲线

Fig. 6 Curve of voltage unbalance

4)谐波

如图 7 所示,所测得的逆变器输出的三相电压中,a 相电压总谐波畸变率平均值为 1.33%,b 相电压总谐波畸变率平均值为 1.09%,c 相电压总谐波畸变率平均值为 1.08%,均符合标准要求。在测试期间,谐波符合国家电能质量标准要求。

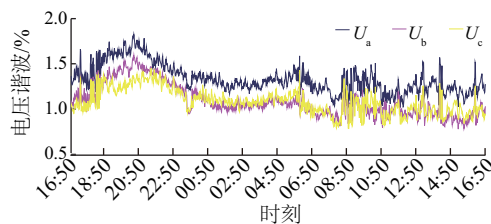


图7 电压总谐波畸变率变化曲线

Fig. 7 Curve of voltage total harmonic

5)电压波动

如图 8 所示,所测得的 a 相电压波动为 0.287%,b 相电压波动为 0.287%,c 相电压波动为 0.294%,均符合标准要求。在测试期间,电压波动超出国家电能质量标准限值。

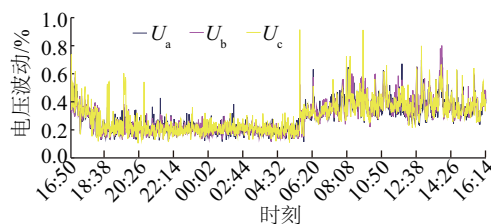


图8 电压波动变化曲线

Fig. 8 Curve of voltage fluctuation

6)电压闪变

如图 9 所示,所测得长闪变在 10:10~16:10 之间,长闪变值大于 1,其于时间段内符合标准要求。在测试期间,长闪变超出国家电能质量标准限值。

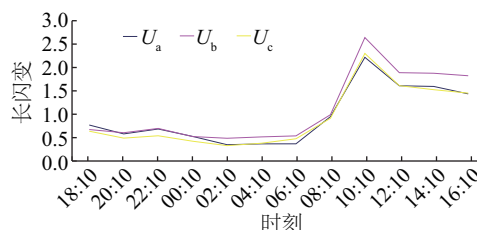


图9 电压闪变变化曲线

Fig. 9 Curve of voltage long flicker

3 结论

在为期近 2 个月的功率特性和电能质量特性现场测试工作中,得到“万山号”波浪能发电装置的功率特性矩阵、整机转换效率和年发电量等功率特性指标。通过对功率特性矩阵图谱的分析可发现,波浪周期普遍小于 6.0 s、与周期相对应的波高普遍也小于 1 m。因此,本文得到的是“万山号”波浪能发电装置在小浪情况下的功率特性指标。在电能质量特性方面,“万山号”波浪能发电装置的电压偏差、长闪变两项指标有超过国家电能质量标准限值的情况,而频率偏差、电压不平衡度、谐波、电压波动等电能质量特性指标符合国家电能质量标准限值。

[参考文献]

- [1] 国家海洋技术中心. 中国海洋能技术进展 2017[M]. 北京: 海洋出版社, 2017, 21-52.
National Ocean Technology Center. China ocean energy technology progress 2017[M]. Beijing: China Ocean Press, 2017, 21-52.
- [2] 盛松伟, 张亚群, 王坤林, 等. 鹰式波浪能发电装置发电系统研究[J]. 可再生能源, 2015, 33(9): 1422-1426.
SHENG S W, ZHANG Y Q, WANG K L, et al. Experiment research on the power generation system of the sharp eagle wave energy converter[J]. Renewable energy resources, 2015, 33(9): 1422-1426.
- [3] 郑松根, 何宏舟. 浮摆式波浪发电平台系泊系统设计[J]. 中国造船, 2015, 56(2): 102-112.
ZHENG S G, HE H Z. Design of the mooring system on the wave power platform with floating and pendular type[J]. Shipbuilding of China, 2015, 56(2): 102-112.
- [4] 余海涛, 刘春光, 费腾, 等. 直驱式波浪发电系统研究[J]. 海洋开发与管理, 2013, 30(b12): 43-46.
YU H T, LIU C G, FEI T, et al. Research on direct drive wave power system[J]. Ocean development and

- management, 2013, 30(b12): 43-46.
- [5] 王项南, 王静, 李雪临, 等. 潮流能发电系统性能评估方法研究[J]. 海洋技术, 2013, 32(3): 236-241.
WANG X N, WANG J, LI X L, et al. Study on assessment of performance of the tidal energy conversion systems[J]. Ocean technology, 2013, 32(3): 236-241.
- [6] PD IEC/TS 62600- 200: 2013, Marine energy. Wave, tidal and other water current converters. Electricity producing tidal energy converters. Power performance assessment[S].
- [7] Department of Energy and Climate Change, European Marine Energy Centre Ltd. Assessment of performance of wave energy conversion systems[R]. URN 09/559 2009.
- [8] 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.
WANG X N, XIA H N, LI X L, et al. Study on the on-site detecting techniques for marine energy power generation devices [J]. Journal of ocean technology, 2014, 33(4): 112-116.
- [9] 王项南, 夏海南, 崔琳, 等. 海洋能发电装置现场检测平台设计[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(2): 64-68.
WANG X N, XIA H N, CUI L, et al. Design of the on-site testing platform for marine energy converters [J]. Journal of ocean technology, 2015, 34(2): 64-68.
- [10] GB/T 12325—2008, 电能质量: 供电电压偏差[S].
GB/T 12325—2008, Power quality: deviation of supply voltage[S].
- [11] GB/T 15945—2008, 电能质量: 电力系统频率偏差[S].
GB/T 15945—2008, Power quality: frequency deviation for power system[S].
- [12] GB/T 15543—2008, 电能质量: 三相允许不平衡度[S].
GB/T 15543—2008, Power quality: three-phase voltage unbalance[S].
- [13] GB/T 14549—1993, 电能质量: 公用电网谐波[S].
GB/T 14549—1993, Quality of electric energy supply: harmonics in public supply network[S].
- [14] GB/T 12326—2008, 电能质量: 电压允许波动和闪变[S].
GB/T 12326—2008, Power quality: voltage fluctuation and flicker[S].
- [15] 王项南, 俞彦辉, 夏海南. 波浪能发电装置功率特性现场测试分析方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1): 70-76.
WANG X N, YU Y H, XIA H N. Research on power characteristic field test analysis method of wave energy generation device [J]. Chinese journal scientific instrument, 2019, 40(1): 70-76.

SITE TESTING AND ANALYZING OF WAVE ENERGY CONVERTER

Wang Xiangnan¹, Xia Hainan¹, Zhang Yuanfei¹, Yu Yanhui^{1,2}, Guo Yi¹, Jia Ning¹

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

2. School of Precision Instruments & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Using the wave energy converter power performance assessment specification published by International Electrotechnical Commission, taking wind energy converter test stander into consideration, basing on the development state of wave energy converters, the field test indexes of wave energy power generation device in China are determined that mainly includes power characteristic matrix, conversion efficiency, voltage deviation, frequency deviation, and so on. And then a field testing method is proposed. By this method, the field testing work has been carried out on “Wanshan” wave energy converter. Power performance and power quality performance of wave energy converter have been analyzed by using the test data.

Keywords: ocean wave energy; wave energy converter; valuation method; power performance; power quality performance