

双体船式波浪能发电系统实验测试研究

宋瑞银¹, 吴映江^{1,2}, 陈凯翔^{1,3}, 蔡泽林^{1,3}, 吴烨卿^{1,2}, 陈俊华¹

(1. 浙江大学宁波理工学院, 宁波 315100; 2. 宁波大学机械学院, 宁波 315211; 3. 浙江科技学院机械与能源工程学院, 杭州 310023)

摘 要: 提出双体船式波浪能发电试验平台,将船体和波浪浮子简化为大小2种浮子,建立双浮子波浪能捕获理论模型。针对波浪能间歇性强的特点,设计波浪能捕获-液压蓄能稳压-液压马达驱动发电机发电系统,并通过实验室拖动发电实验建立流量-压力-比例伺服阀开口度的关系曲线,实验结果证明通过实时调节比例伺服阀开口度实现发电功率的稳定是可行的。最后,将发电系统安装到试验平台,开展单个小浮子和2个小浮子波浪能捕获的海上测试。海试结果表明,该方法具有良好的稳定发电效果;浮子数量越多,波浪来能越大,发电功率越稳定。

关键词: 波浪能发电装置; 发电建模; 振荡浮子; 稳压控制; 实验测试

中图分类号: P751

文献标识码: A

0 引 言

作为一种绿色环保的可再生能源,波浪能捕获已得到众多关注和研究,并已涌现一系列成果。按照装置的能量提取方式分类,可将现有波浪能捕获装置分为振荡水柱式、越浪式和振荡浮子式等^[1-6]。振荡浮子式波浪能捕获装置主要利用波浪能推动浮子运动,再把浮子运动传递或转换为其他能量,其研究及应用较为广泛。另外,就放置方式而言,波浪能装置可分为固定式和漂浮式等类型。其中,漂浮式波浪能装置因为具有可拖动有效躲避台风等恶劣海况、建造方便、便于维修等优点,日益得到关注。本文设计一种双体船漂浮式波浪能发电装置,介绍整体结构,建立双浮体波浪能捕获装置的功率捕获模型,并设计间歇性波浪能稳压发电系统和稳压控制方法,最后通过海上试验进行验证。试验结果表明该发电系统具有良好的稳压发电控制性能。

1 双体船式发电平台结构

双体船具有较大的船宽和初稳性,通常拥有良

好的完整稳性和破损稳性,且兴波阻力小,具有承受较大风浪的能力^[7]。基于上述特点,本文提出如图1所示船形双浮子波浪能、潮流能发电平台。大浮子为船形浮台,小浮子为船形浮子阵列。船形浮台设计为双体船式,与传统的单体船形浮台相比具有稳定性好、阻力小、横摇周期短和便于拖动等优点^[8]。为使双体船式发电平台能在潮流能发电时自动对水和便于拖拽,装置锚系设计为单锚系统。在单锚系统约束下,漂浮平台与振荡浮子的相对运动幅度决定了装置波浪能的捕获功率。在波浪能的作用下,振荡浮子吸收来自海水的波浪能,将其转换为浮子的动能与势能。浮子上下摆动,推动液压缸做活塞运动,完成吸油和将液压油打入液压系统的过程,此过程将浮子的机械能转换为液压系统的液压能。进入液压系统的能量先储存在蓄能器中,通过蓄能器释放液压能转换为液压马达的动能。马达带动发电机转动,转换为电能。图2为波浪能发电系统原理图,系统主要由波浪能捕获、油路换向、能量蓄积、流量调节、发电部分组成。能量采集部分由振荡浮子13和液压油缸1组成,把波浪能转化为液压能。

收稿日期: 2018-07-09

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0300500); 海洋可再生能源专项资金(NBME2011CL02); 宁波市重大科技攻关项目(2017C110005)

通信作者: 宋瑞银(1974—), 男, 博士、副教授、硕士生导师, 主要从事海洋能发电及抗浪技术方面的研究。ruiyinsong@163.com

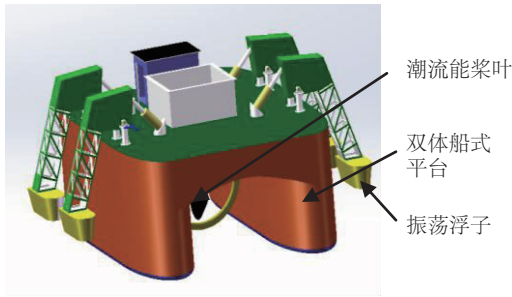
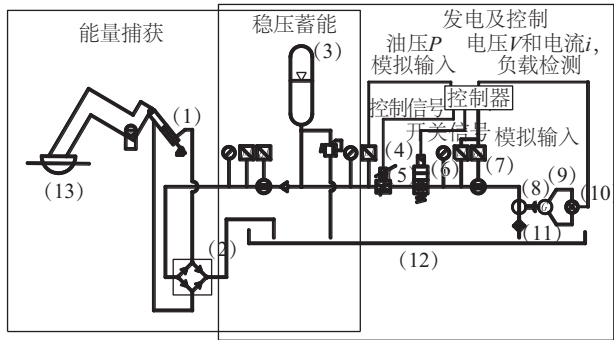


图1 双体船式海洋能发电平台模型

Fig. 1 Ocean energy conversion platform with catamaran structure



1. 液压油缸 2. 液压换向桥路 3. 蓄能器 4. 压力传感器
5. 二通比例流量阀 6. 电磁球阀 7. 流量传感器 8. 液压马达
9. 单相同步发电机 10. 负载 11. 高压滤油器
12. 液压密闭油箱 13. 振荡浮子。

图2 波浪能液压蓄能发电系统原理

Fig. 2 Power principle of wave energy generator with hydraulic accumulator

油路换向部分由换向阀组2构成,通过换向阀组的作用,实现不论油缸是行程还是回程,液压油都通过进油口进入液压系统,从油箱吸油到液压油缸。能量蓄积部分由蓄能器3构成,实现蓄能缓冲作用。流量调节部分由压力传感器4、比例流量阀5、流量传感器7、控制器组成,控制进入液压马达的流量和压力。发电部分由液压马达8和发电机9组成,实现液压能转化为电能。通过振荡浮子将间歇性的波浪能转换为液压能,并蓄积在蓄能器中,当蓄能器压力达到设定值时,比例阀开启,蓄能器中的高压油即可驱动液压马达转动,再驱动发电机发电。

2 波浪能捕获的理论模型

由于整个平台只受单锚固定,装置本身在波浪

作用下也会多自由度晃动。而小浮子受连接摆杆的约束,相对船体自由度减小为1个,即绕船体固定轴的摆转。故将船体和摆动浮子视为大小2种浮子。为简化计算,可近似看作大小浮子间的垂荡运动。假设流体为理想流体,水深 h 相对波长 λ 足够大,不可压缩,重力不可忽略,运动无旋,入射波为线性规则波^[9]。将船体和船型小浮子均简化为长方体浮子。

由垂荡浮子固有频率理论可知,浮子运动的振幅受系统阻尼影响较大^[10],当阻尼最小时可获得最大的共振。当浮子垂荡固有频率与入射波震荡频率相同,即浮子与波浪共振时,垂荡系统的总能量 E_z 和在一个波周期范围内的平均功率 \overline{P}_z 可分别表示为:

$$E_z = 0.5[(m + m_w)\omega^2 + \rho g A_{wp}]Z_0^2 \quad (1)$$

$$\overline{P}_z = \frac{1}{T} \int_0^T P_z dt = \frac{F_0 \omega Z_0}{2} \quad (2)$$

式中, ω ——波浪圆频率,rad/s, $\omega = 2\pi/T$; T ——波浪周期,s; m ——浮子质量,kg; m_w ——浮子附加质量,kg; ρ ——海水密度,取 $\rho = 1.025 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; A_{wp} ——浮子水面截面积, m^2 ; Z_0 ——浮子运动的振幅,m; F_0 ——浮子受波浪力幅值,N。长方柱浮体($L \times B \times Z$)的理论附加质量 m_w 和水面截面积 A_{wp} 表达式分别为 $m_w = k_m \pi \rho L B^2 / 4$, $A_{wp} = LB$ 。其中, K_m 为附加质量系数, L 和 B 分别为长方体浮子的长和宽,m。

物体的垂荡位移幅值 Z_0 一般可表述如下:

$$Z_0 = \frac{F_0 / \rho g A_{wp}}{\sqrt{(1 - \omega^2 / \omega_z^2) + (2\Delta_z \omega / \omega_z)^2}} \quad (3)$$

式中, Δ_z ——无量纲垂荡阻尼系数^[11]。当浮子几何形状及材料确定时, ω_z 确定,则可确定频率比 ω / ω_z ,再根据阻尼比值放大系数与相角随频率比的变化关系^[10],即可确定 $Z_0 / (F_0 / \rho g A_{wp})$,当 F_0 确定, Z_0 即可确定。

设长方体大浮体长度和宽度分别为 L_1 和 B_1 ,小浮体长度和宽度分别为 L_2 和 B_2 。入射波为线性波,波长 λ ,吃水深度 $d \ll \lambda$,故 $\left(e^{-\frac{2\pi d}{\lambda}} + 1\right)$ 的乘积近似小于2(约1.96),可简化求得长方体大浮体波浪力幅值 F_{L_1} 和小浮体波浪力幅值 F_{L_2} 分别为:

$$F_{L_1} = \frac{\rho g H B_1 \lambda}{2\pi} \sin\left(\frac{\pi L_1}{\lambda}\right) \left(e^{\frac{-2\pi d}{\lambda}} + 1 \right) \quad (4)$$

$$\approx \frac{\rho g H B_1 \lambda}{\pi} \sin\left(\frac{\pi L_1}{\lambda}\right)$$

$$F_{L_2} = \frac{\rho g H B_2 \lambda}{\pi} \sin\left(\frac{\pi L_2}{\lambda}\right) \quad (5)$$

式中, g ——重力加速度, 9.8 m/s^2 ; H ——波高, m ; λ ——波长, m , $\lambda = gT^2/2\pi$; d ——吃水深度, m 。

设 $\frac{z_0}{F_0/\rho g A_{\text{wp}}} = f\left(\frac{\omega}{\omega_z}\right) = k$, 船形大浮子和小浮子的相应数值分别为 k_{L_1} 和 k_{L_2} , 联立式(5)可求得:

$$Z_{0L_1} = k_{L_1} \frac{F_{L_1}}{\rho g A_{\text{wp}L_1}} = \frac{k_{L_1} \frac{\rho g H B_1 \lambda}{\pi} \sin\left(\frac{\pi L_1}{\lambda}\right)}{\rho g L B} \quad (6)$$

$$= f\left(\frac{\omega}{\omega_z}\right) \frac{g T^2 H}{4\pi^2 L_1} \sin\left(\frac{2\pi^2 L_1}{g T^2}\right)$$

$$Z_{0L_2} = k_{L_2} \frac{F_{L_2}}{\rho g A_{\text{wp}L_2}} = \frac{k_{L_2} \frac{\rho g H B_2 \lambda}{\pi} \sin\left(\frac{\pi L_2}{\lambda}\right)}{\rho g L B} \quad (7)$$

$$= f\left(\frac{\omega}{\omega_z}\right) \frac{g T^2 H}{4\pi^2 L_2} \sin\left(\frac{2\pi^2 L_2}{g T^2}\right)$$

理论上双浮子的相对振幅 Z_{0c} 在大小浮子振幅的叠加范围内, 考虑到实际海况中存在的其他各种不确定因素, Z_{0c} 取最小值, 即 $Z_{0c} = Z_{0L_2} - Z_{0L_1}$, 则可得到双浮子的波浪能捕获功率:

$$\begin{aligned} \overline{P_z} &= \frac{1}{T} \int_0^T P_z dt = \frac{F_{L_2} \omega Z_{0C}}{2} \\ &\approx \frac{\rho g^2 H^2 T B_2 \lambda}{4\pi^2} \sin\left(\frac{\pi L_2}{\lambda}\right) \left(\frac{k_{L_2}}{L_2} \sin\left(\frac{2\pi^2 L_2}{g T^2}\right) - \frac{k_{L_1}}{L_1} \sin\left(\frac{2\pi^2 L_1}{g T^2}\right) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

3 波浪能发电稳定控制策略

在波浪作用下, 双体船大浮子和小浮子间产生相对运动。大小浮子的相对运动将转换为液压油缸的伸缩运动(如图1所示)进而为液压系统泵入高压液压油。由于波浪来能不稳定, 间歇性强, 这导致伸缩油缸泵入的高压液压油间歇性强, 即使经过液压蓄能环节后也不稳定。因此, 需解决波浪能发电稳定控制问题, 这方面的研究较多, 如遗传算法(GA)和人工神经网络(ANN)、模糊控制和模型预测控制(MPC)等^[11-18]。然而, 这些控制方法大多需建立复杂的数学模型, 控制过程复杂, 难以对实际

海况中极不稳定的波浪能实现发电输出功率的实时稳定控制。为保证发电过程的稳定, 采用蓄能稳压-液压马达恒流量控制方式进行发电, 即通过一定容量的高压液压蓄能器将浮体摆动驱动的高压液压油储存起来。液压蓄能器达到设定的压力值后, 即开启比例阀, 高压液压油驱动液压马达发电。用于海洋能发电的液压蓄能发电系统如图3所示。



1. 液压站 2. 压力传感器 3. 流量传感器 4. 液压马达
5. 单相发电机 6. 油箱 7. 高压蓄能器 8. 电液比例阀
9. PLC 10. 负载

图3 间歇性波浪能发电系统

Fig. 3 Intermittent wave energy generation experimental system

系统主要包括叶片泵、发电机、液压蓄能器、压力传感器、流量传感器、油路和控制系统等。为了便于模拟波浪浮子推动液压缸的往复运动, 增加了液压泵站和换向阀, 通过换向阀周期性的换向实现液压系统泵油的波动性和间歇性。在液压蓄能器出口比例阀开口固定时, 液压蓄能器的压力和液压马达入口处的流量均呈快速下降趋势, 这也导致不经控制的发电机发电电压和功率呈快速下降, 输出电流品位不高。为实现发电机输出功率稳定在一定范围, 只需保证液压马达输入流量稳定即可。在浮子摆动驱动的液压能供能不足或无供能时, 液压蓄能器压力将持续降低。为保证马达入口流量稳定在一定范围, 必须持续增大比例阀开口。如何得到流量在一定程度时的比例阀开口度, 则需通过实验得到, 并建立实验数据库。

实验时, 当液压蓄能器压力到预定压力后开启比例阀, 并将开口度固定, 实时测量记录液压马达入口处的流量、压差值; 调节比例阀开口度, 从 10% 逐步调节到 100%, 重复试验, 再得到对应的流量、压差值, 建立流量-压差-开口度对应关系数据库。通过该数据库, 可查取设定的稳定流量压力值范围时对应的比例阀开口度。液压马达工作发电时, 为

了保证在一定程度稳定的发电功率,可通过流量传感器和压力传感器实时监测入口流量和压力,以此查取流量-压差-开口度数据库,得到对应的比例阀开口度。

图3所示的发电系统中,当液压蓄能器压力达到16~20 MPa时即可发电工作。此时将比例流量阀开口开到一个定值,通过压力传感器和流量传感器,把蓄能器当前压力值 p_1 、马达进口压力 p_2 和输入马达的流量 q 等参数记录下来。形成压力-流量-比例阀开口度数据库,并进行进一步处理,实现波浪能液压蓄能实验装置的平稳发电。

4 实验测试与数据分析

4.1 流量-压力-比例阀开口度数据库的建立

实验中,由于比例阀开口度在30%以下时,液压马达入口处流量不足以驱动发电机发电,故比例阀开口度取值为30%~100%,每次增加10%,得到压力、流量曲线。为了保证流量稳定,在曲线图中画一条流量为固定值的水平线,水平线与曲线簇的交点即为保持该固定值时的压差和开口度。计算得到稳定发电时的最佳流量值为18 L/min。作为对照,分别画出了15~17 L/min的水平线,得到交叉点的压差和开口度。图4为调整比例阀开口度得到的压差-流量-开口度实验曲线。从图4中可看出,当比例阀开口一定时,压差增大,液压马达入口流量增大;当要保持流量约为18 L/min,对于不同的压差,有与其对应的合适的开口大小。

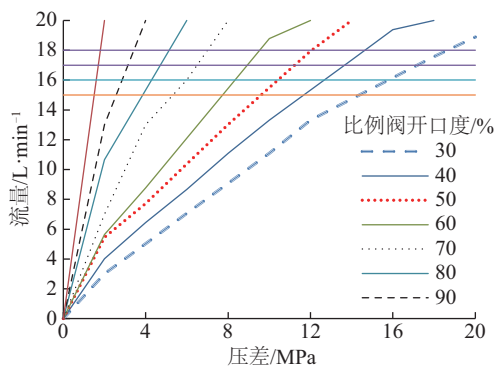


图4 液压发电系统压差-流量-开口度实验曲线

Fig. 4 Relationship between experimentally obtained flow rate and the pressure-drop with each opening-ratio

4.2 实验室拖动实验与分析

在得到流量-压差-开口度实验数据库基础上,

通过PLC和比例伺服阀结合的方式实现液压马达的恒流量控制,进行波浪能液压蓄能发电装置实验室拖动实验。通过液压站给蓄能器泵油,液压站出口接入1个三位四通换向阀和液压换向桥路,以此来模拟柱塞缸往复运动时造成的油压冲击。蓄能器的初始开启压力为20 MPa,换向阀换向周期为4 s,通过实时调节比例阀开口度的方式保证液压马达流量控制在约18 L/min。图5为液压发电系统工作3个周期时的工作曲线,稳定发电持续时间为290~310 s,而能量储存时间为400~440 s。这表明,在来能连续输入的情况下,控制比例伺服阀开口度仍可实现流量在一定范围内的稳定,并保证发电输出功率的稳定。

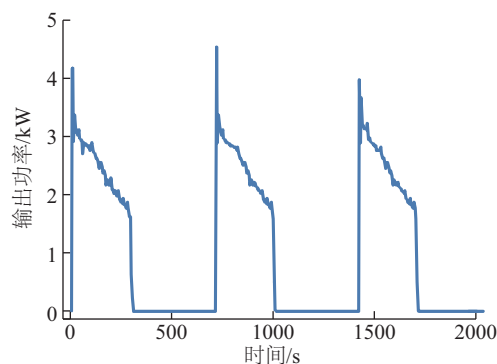


图5 稳压控制时的实验输出功率曲线

Fig. 5 Experimental output power curve with stabilization control method

4.3 海上试验测试与分析

在国家海洋局海洋可再生能源专项资金资助下,项目组研制了漂浮式波浪能、潮流能发电试验平台。试验平台总长14 m,宽11 m,高6 m。侧面安装2个摆动浮子捕获波浪能,并将图3中的液压发电系统安装于海试平台中,将油管与波浪能浮子中的柱塞油缸油口连接。试验时,采用大功率灯泡和电阻阵列作为负载进行测试。将波浪能浮子和液压发电系统结合,并安装在双体船式发电系统上。海试地点为浙江象山石浦港檀头山岛西南部海域(图6中显示区域,经度:121.997°E,纬度:29.158°N),该处浪高在0.8~1.8 m的范围,波浪周期为3.5~6.0 s。

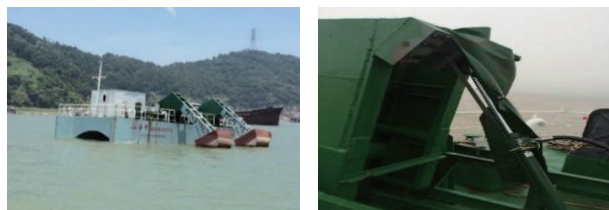
在双体船式海洋能测试平台中安装2套小浮子,小浮子分别采用2套柱塞式液压缸和换向液压桥路,二者并联到共用的一套液压蓄能器和发电系

统。图 7 为海洋能测试平台及柱塞式液压缸,平台中双浮子的相对运动就转换为该液压缸的伸缩运动。为保证液压发电系统尤其是蓄能器的安全,在系统中设置多个溢流阀,溢流阀压力设置为 25 MPa。试验时,由于试验海域受到地形的限制,波高和频率均不稳定,为不规则波,实测波高为 0.8~1.8 m 的范围,周期在 3.5~6.5 s 的范围。设计选择的柱塞泵最大行程为 1000 mm,柱塞泵一端连接浮子摆杆,另一端采用楔形滑块固定锁死装置,可根据试验平台的吃水深度调节柱塞泵的固定位置,确保柱塞泵的伸缩在最大行程范围内。试验中,发电机发电后直接为负载供电。负载采用灯泡组和电阻丝式电炉并联的方式,灯泡额定总功率为 3 kW,电阻丝式电炉功率为 4.5 kW。海试过程中,浮子在波浪作用下摆动,不断给高压蓄能器泵油。液压蓄能器进行蓄能-蓄能器出口开启-高压液压能释放-蓄能器出口关闭-再次蓄能的周期性工作。高压油周期性的释放驱动马达转动,并带动发电机发电。分别进行单个浮子捕获能量发电、双浮子捕获能量发电实验和波高约为 0.8、1.1 和 1.5 m 的实验。



图 6 海试地点

Fig. 6 Place of sea test



a. 海洋能测试平台

b. 柱塞式液压缸

图 7 试验用海洋能测试平台与柱塞式液压缸

Fig. 7 Test platform for test marine energy and plunger cylinder

试验中,保持液压泵流量约为 18 L/min,蓄能器开启压力设置在 22 MPa,关闭压力设置为 12 MPa。

图 8 为波高约为 1.5 m 时,单个浮子工作时的发电机功率曲线。从图 8 中可看出,1 个发电周期内,系统持续发电时间为 150~180 s,稳定发电功率 1.0~2.8 kW,间隔时间 70~100 s,且每个发电周期内发电输出功率曲线相对一致。同时,这也和实验室拖动实验曲线基本一致,但由于输入来能较大,所以发电间隔时间大为缩短。

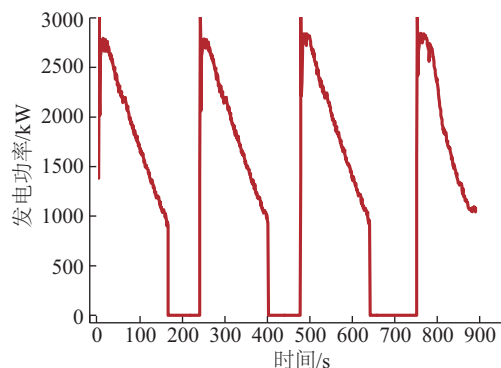


图 8 单浮子发电功率曲线

Fig. 8 Single float power generation power curve

图 9 为波高分别为 1.5、1.1 和 0.8 m 时的单浮子发电功率曲线。试验测试时,仍保持液压泵流量在约 18 L/min 的范围,蓄能器开启压力设置在 22 MPa,关闭压力设置为 12 MPa。从图 9 中可看出,3 种海况时的单周期发电功率曲线基本一致。如进一步比较,可发现波高为 1.5 m 时的发电功率曲线最长,波高为 0.8 m 时的发电功率曲线最短,这是因为液压蓄能器在为液压马达释放高压油的同时,波浪浮子也在摆动,柱塞泵仍在为液压蓄能器提供高压油。浪高更大时,提供的能量更多,所以

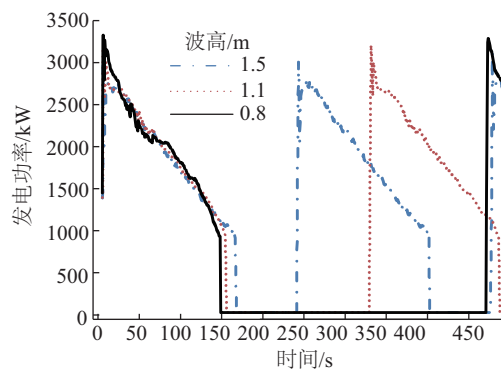


图 9 3 种海况下的系统发电功率曲线

Fig. 9 System power generation curve under three sea conditions

1.5 m 波高时的发电持续时间相对较长,但和 0.8 m 波高海况时相比,持续稳定发电时间增加 20~30 s 的范围,并不非常明显。从发电周期间隔时间来看,1.5、1.1 和 0.8 m 这 3 种波高海况的间隔时间分别约为 80、180 和 300 s。这表明不同波浪来能对系统稳定发电间隔时间有明显影响。

在单个浮子测试的基础上,将 2 个浮子并联接入同一个液压发电系统并进行发电测试。图 10 为波高在 1.1 m 时的发电系统功率测试曲线,比例伺服阀随压力实时调节。从 10 图中可看出,比例伺服阀开启,发电系统开始工作后,发电功率从 2.8 kW 开始逐渐下降,到 200 s 后,功率曲线逐渐稳定在 1.5~1.7 kW。功率曲线有小范围的波动,这主要与波浪来能时大时小有关,但总的曲线较稳定。这表明本方法对实际的发电稳定起到良好效果。

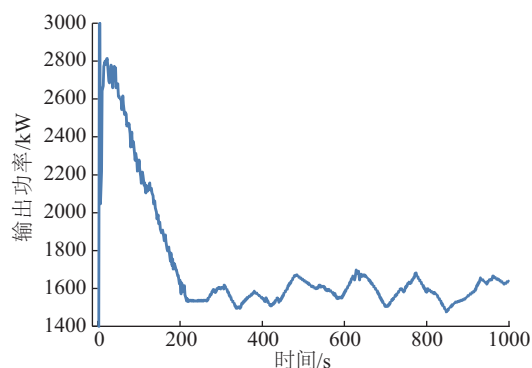


图 10 并联浮子发电功率曲线

Fig. 10 Power generation curve of parallel float

5 结 论

本文提出一种基于流量控制的稳定功率方法。通过一个比例流量阀开口度的实时调节消除扰动周期的峰值压力脉冲反馈控制方法,实现了有效、稳定和连续波能量捕获和稳定的发电功率输出。通过波浪能液压发电系统实验室测试得到液压伺服比例阀的开口度和流量、压力的对应关系。成功进行波浪能液压蓄能发电的实验室测试和海上试验测试,得到以下结论:

1)与以往的复杂控制理论和算法相比,该方法相对简单可靠,能在较宽的工作范围内使输出功率

更稳定;

2)提出基于实验数据库的方法得到的比例阀口开启控制方案,并建立流量-压力-比例阀开口对应关系,通过实验实现发电输出功率的平稳控制;

3)在单个浮子试验的基础上,系统通过 2 个浮子并联的方式,并在海上进行实验测试,实现系统的连续稳定发电。

当然,该方法也有局限性,针对小功率发电系统通过实验室拖动实验容易得到开口-流量的实验数据库,对兆瓦级以上的发电,实验室拖动试验的成本相对较高。

[参考文献]

- [1] 游亚戈, 李 伟, 刘伟民, 等. 海洋能发电技术的发展现状与前景[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(14): 1—12.
- [1] You Yage, Li Wei, Liu Weimin, et al. Development status and perspective of marine energy conversion systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 1—12.
- [2] 肖晓龙, 肖龙飞, 杨立军. 串联直驱浮子式波浪能发电装置能量捕获研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(2): 398—405.
- [2] Xiao Xiaolong, Xiao Longfei, Yang Lijun. Energy harvesting study of series direct driven float wave energy converter[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2018, 39(2): 398—405.
- [3] 刘玉新, 麻常雷. 英国海洋能开发利用分析[J]. 海洋开发与管理, 2018, (3): 3—8.
- [3] Liu Yuxin, Ma Changlei. The utilization of marine renewable energy in UK[J]. Marine Development and Management, 2018, (3): 3—8.
- [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.
- [4] National Ocean Technology Center. Marine energy technology progress of China 2016[M]. Beijing: Ocean Press, 2016.
- [5] 阎耀保, 张 阳. 悬挂摆式波能发电装置聚波口的优化设计[J]. 中国工程机械学报, 2016, 14(5): 414—420.
- [5] Yin Yaobao, Zhang Yang. Optimal design on wave-focusing orifice of pendulum wave energy generator[J].

- Chinese Journal of Construction Machinery, 2016, 14 (5): 414—420.
- [6] Yang Yingchen, Diaz I, Morales M. A vertical-axis unidirectional rotor for wave energy conversion[J]. Ocean Engineering, 2018, 160: 224—230.
- [7] 陈 亮, 曾令斌. 高速双体船的破损稳性衡准分析[J]. 广东造船, 2014, (6): 41—44.
- [7] Chen Liang, Zeng Lingbin. Study on high catamaran's damage stability criterion[J]. Guangdong Shipbuilding, 2014, (6): 41—44.
- [8] 肖惠民, 于 波, 蔡维由. 世界海洋波浪能发电技术的发电现状与前景[J]. 水电与新能源, 2011, 93(1): 67—69.
- [8] Xiao Huimin, Yu Bo, Cai Weiyou. The development status and prospects of ocean wave power generation technology in the world[J]. Hydropower and New Energy, 2011, 93(1): 67—69.
- [9] Thorpe T W, Picken M J. Wave energy devices and the marine environment[J]. IEE Proceedings-A, 1993, 140 (1): 63—70.
- [10] Michael E McCormick. Ocean wave energy conversion [M]. New York: Dover Publications, 2007, 45—57.
- [11] 马 哲. 振荡浮子式波浪发电装置的水动力学特性研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- [11] Ma Zhe. The study on hydrodynamic performance of oscillating floater buoy wave energy convertor[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.
- [12] Valrio D, Mendesb M, Beirao P, et al. Identification and control of the aws using neural network models[J]. Applied Ocean Research, 2008, 30: 178—88.
- [13] Schoen M, Hals J, Moan T. Wave prediction and robust control of heaving wave energy devices for irregular waves[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2011, 26: 627—638.
- [14] Raymond Alcorn, Dara O'Sullivan. Electrical design for ocean wave and tidal energy system [M]. London: The Institution of Engineering and Technology, 2013: 111—129.
- [15] 肖 曦, 摆念宗, 康 庆, 等. 波浪发电系统法制及直驱式波浪发电系统研究综述[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 1—11.
- [15] Xiao Xi, Bai Nianzong, Kang Qing, et al. A review of the development of wave power system and the research on direct-drive wave power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3): 1—11.
- [16] Muhando E B, Senjyu T, Urasaki N, et al. Gain scheduling control of variable speed WTG under widely varying turbulence loading[J]. Renewable Energy, 2007, 32(14): 2407—2423.
- [17] 鲍经纬, 李 伟, 张大海, 等. 基于液压传动的蓄能稳压浮力摆式波浪能发电系统分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 205—209.
- [17] Bao Jingwei, Li Wei, Zhang Dahai, et al. Analysis of an inverse pendulum wave power generation system with pressure- maintaining storage based on hydraulic transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 205—209.
- [18] Wang Liguang, Isberg J, Tedeschi E. Review of control strategies for wave energy conversion systems and their validation: The wave-to-wire approach [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 366—379.

EXPERIMENTAL TEST STUDY OF WAVE ENERGY GENERATION SYSTEM WITH CATAMARAN PLATFORM

Song Ruiyin¹, Wu Yingjiang^{1,2}, Chen Kaixiang^{1,3}, Cai Zelin^{1,3}, Wu Yeqin^{1,2}, Chen Junhua¹

(1. *Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China;*

2. *School of Mechanical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;*

3. *School of Mechanical & Energy Engineering, Zhejiang University of Science & Technology, Hangzhou 310023, China)*

Abstract: This paper proposed a wave energy conversion and electrical generation test platform with catamaran shapes. Through simplifying the hull and wave buoy into two type of floats, i.e. big and small buoys, a theoretical model of wave energy convertor system with double buoy was established. Aiming at the intermittent feature of wave energy, a wave power generator was designed, witch includes wave energy capture part, hydraulic energy stabilize part and hydraulic motor driven par. In the paper, the relationship among the flow, pressure and opening ratio of proportional servo valve is established through power generation experimental test in laboratory. The experimental results prove that it is feasible to stabilize the power generation by adjusting the opening ratio of the proportional servo valve in real time. Finally, the power generation system was installed on the test platform with catamaran shapes, and a series of sea tests for single small buoy and two small buoys wave energy captures were carried out respectively. The sea test results show that it has well stabilize performance with the method above. With the increase of the number of buoys and the increase of the wave energy, the electrical power generation become more stable.

Keywords: wave energy convertor; modeling of power generation; oscillating buoys; pressure stable control; experimental test