

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2021.01.012

基于 MATLAB and Simulink 的波浪能装置液压能量转换系统仿真研究

叶寅^{1,2,3,4}, 盛松伟^{1,2,3,4}, 乐婉贞^{1,2,3,4}, 王坤林^{1,2,3,4}, 张亚群^{1,2,3,4}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广东 广州 510640;
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458;
4. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广东 广州 510640)

摘 要: 液压式能量转换系统是波浪能发电装置应用最为广泛的一种能量转换方式。本文针对波浪能液压能量转换系统展开了模型仿真研究, 建立了带有蓄能稳压环节和液压自治控制器的波浪能装置液压能量转换系统的数学模型。基于所建立的数学模型搭建了波浪能装置液压转换系统的 MATLAB and Simulink 仿真框图, 对系统进行仿真, 并利用实海况实验得到的发电数据和仿真数据进行对比。结果显示, 二者之间的相对误差较小, 验证了该系统仿真模型的准确性。此外, 还分别模拟了规则波和随机波输入情况下液压能量转换系统的发电特性曲线。仿真结果表明, 无论是规则波还是随机波, 经过液压能量转换系统之后, 输出的发电特性都比较稳定, 也即是利用该能量转换系统实现将不稳定的波浪能转换成稳定的电能, 提高了发电质量, 为后续的电力输送及并网提供了便利。

关键词: 波浪能; 液压系统; 发电特性; 能量转换; 自治控制; 仿真模型

中图分类号: P743.2; TK79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029(2021)01-0087-09

波浪能作为一种可再生能源, 具有储量丰富、分布广泛等特点^[1], 并且在转换过程几乎不产生污染, 因此受到越来越多的沿海国家重视, 如何开发和利用波浪能成为了当前研究热点。

波浪能最主要的利用方式就是发电, 波浪能装置一般通过三级能量转换过程, 将波浪能最终转换为电能^[2]。第一级是将波浪能转换为机械能, 第二级将机械能转换为压力能或其他形式的能量, 第三级将压力能转换为电能。第一级能量转换系统又称为能量俘获系统, 二、三级转换合在一起称为能量

转换系统。根据能量转换系统的不同可以将波浪能装置分为气动式、水力透平式、机械式和液压式等^[3]。由于波浪的方向和大小都是随机的, 且具有低频、出力大等特性^[4], 而带有蓄能环节的液压系统可以很好地缓冲由于波浪的这些特性带来的冲击, 使最终的能量输出平稳, 达到并网的要求。因此液压式的能量转换系统成为当前波浪能装置能量转换方式的主流选择, 国际上比较著名的波浪能装置如 Pelamis^[5]、Wavestar^[6]、Powerbouy^[7] 以及中国的“鹰式”系列波浪能装置^[8] 都是选择液压转换

收稿日期: 2020-06-01

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFE0102500, 2019YFB1504404); 国家自然科学基金资助项目(51709252); 海洋可再生能源专项资金资助项目(GHME2017SF01)

作者简介: 叶寅(1986-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事波浪能研究与利用研究。E-mail: yeyin@ms.giec.ac.cn

系统作为能量转换方式。

目前,国内外对于波浪能装置的研究主要集中在能量俘获过程中装置的水动力学部分,对于能量转换部分的研究较少,在实海况下装置的能量转换系统的数据更为稀少。针对以上情况,本文对具有蓄能环节并且设有液压自治控制器的波浪能能量转换系统进行了仿真研究,同时利用实海况条件下的能量转换系统试验数据作为比对,验证仿真模型的准确性。并模拟了在不同波浪条件下,液压能量转换系统的发电特性。本文的液压式能量转换系统仿真研究可以为实型波浪能装置能量转换系统的参数设计提供理论依据,为预测波浪能装置发电功率提供参考。

1 液压式能量转换系统原理

波浪能装置液压发电原理如图1所示。在波浪的作用下,吸波浮子随波浪往复运动,连接在浮子上的液压缸5做相同频率的上下往复运动,液压缸在往复运动的过程中,将液压油从油箱12泵入到蓄能器组6中,当液压缸往上运动,液压缸有杆腔将液压油经过单向阀2泵入蓄能器,液压缸无杆腔通过单向阀3将液压油吸入,当液压缸往下运动时,无杆腔的液压油通过单向阀4进入蓄能器组6。与此同时,有杆腔通过单向阀1从油箱12吸入液压油。因此在液压缸不断的往复运动过程中,液压油通过液压缸不断的被泵入蓄能器,蓄能器随着液压油的不断增多,压力逐渐上升,此过程将液压缸的机械能转变成了液压油的压力能存储于蓄能器,实现了短期的能量蓄积。当蓄能器的压力上升至设定值时,通过一定的逻辑控制方案,将液动换向阀9

打开,蓄能器中的液压油进行释放,冲击液压马达10,液压马达带动发电机11旋转,将液压能转换为电能。波浪比较小的情况下,由于液压缸的运动速度比较慢,由液压缸泵入蓄能器组的液压油流量小于液压马达的流量时,蓄能器的压力会下降,下降到设定的关闭压力值时,通过控制液动阀,使液压马达和发电机停止旋转,蓄能器组又开始下一个蓄能过程。如果波浪比较大,使液压缸运动速度加快,由液压缸进入蓄能器的流量大于液压马达的流量,进入蓄能器的液压油多于流出的,蓄能器的压力会继续上升,直至相等,此时液压马达转速基本稳定,系统连续发电。

为了实现上述控制方案,本文采用液压自治控制器,如图1中的元件8。液压自制控制器主要由控制液压缸13,蓄能器16,以及球阀14和15组成。液压自治控制器的原理如下:当蓄能器组6的压力增大时,控制液压缸13左移,首先关闭球阀15(初始状态是开启),控制液压缸13左腔的油逐渐进入蓄能器16,随着蓄能器组6的压力继续增大,控制液压缸13继续左移,打开球阀14(初始状态是关闭),此时控制油路可以通过14进入到液动换向阀9,液动换向阀9打开,液压马达开始工作;当蓄能器组6的压力下降时,蓄能器16的液压油会回到控制液压缸13的左端,控制液压缸13右移,关闭球阀14,液动换向阀9的控制油口仍有油,液动换向阀9仍处于打开状态,随着蓄能器组6的压力继续下降,控制液压缸13继续右移,直至打开球阀15,液动换向阀9控制油口的油通过球阀15流向油箱,液动换向阀9回复原位,液压马达关闭。

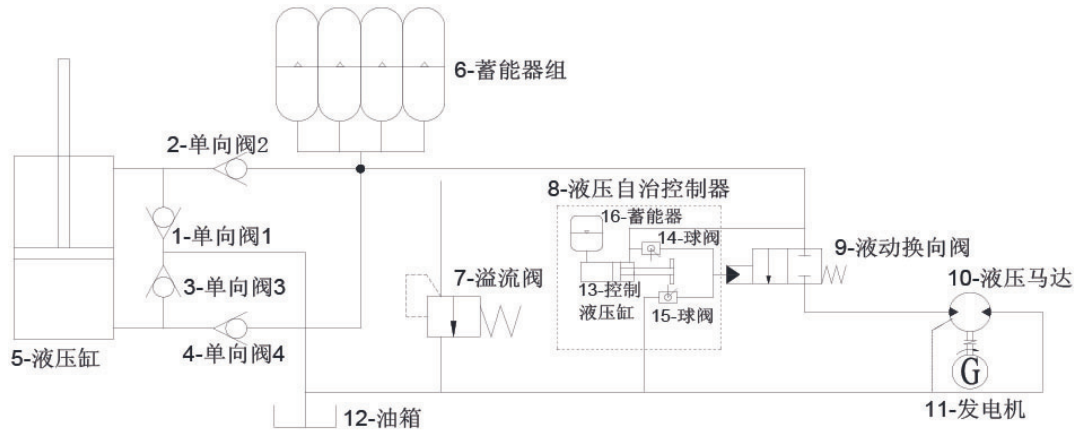


图1 液压能量转换系统原理图

2 系统数学模型

通过系统图1可以看出,系统主要包括液压缸、单向阀组、蓄能器、液压自治控制器、马达和发电机组。本文分别建立各个液压元件的数学模型。

设液压缸的运动速度为 v ,每次运动行程 h ,缸径 d_1 ,液压杆直径 d_2 ,经过单向阀1吸油并通过单向阀2进入蓄能器的有杆腔流量 Q_1 和经过单向阀3并通过单向阀4的无杆腔流量 Q_2 分别表示为:

$$Q_1 = v \times \pi \left(\frac{d_1^2}{4} - \frac{d_2^2}{4} \right) \quad (1)$$

$$Q_2 = v \times \frac{\pi d_1^2}{4} \quad (2)$$

蓄能器采用皮囊式,如果蓄能器入口的流体压力比皮囊内气体的压力高,则流体进入蓄能器并压缩气体,从而储存能量。在整个发电过程中蓄能器经历了两个过程,一个是充油过程(气体压缩过程),一个是放油过程(气体膨胀过程)。蓄能器皮囊内气体的热力学过程可以表示为:

$$p_a V_a^\gamma = \text{constant} \quad (3)$$

式中: p_a 为蓄能器压力; V_a 为体积; γ 为气体常数。

设蓄能器的初始压力为 p_{pr} ,蓄能器的皮囊内

气体初始容积为 V_{pr} ,蓄能器中液压油的容积 V_F 和流量 Q_F 的表达式如下:

$$V_F = \left[1 - \left(\frac{p_{pr}}{p_a} \right)^\gamma \right] V_{pr} \quad (4)$$

$$Q_F = \frac{dV_F}{dt} \quad (5)$$

由液压缸、蓄能器和马达的连续性方程可得^[9]

$$Q_1 + Q_2 = Q_F + Q_m + \frac{V_F}{E} \frac{dp_a}{dt} \quad (6)$$

式中: E 为油液体积模量; Q_m 为马达的流量。

$$Q_m = q_m n_m - k_{leak} \Delta p \quad (7)$$

式中: q_m 为马达排量; n_m 为马达转速; k_{leak} 为马达泄露系数; Δp 表示液压马达的进出口压差,该值通过液压自治控制器来控制,设定液压自治控制器的开启压力为 p_{open} ,关闭压力为 p_{close} 。当蓄能器压力 $p_a > p_{open}$, $\Delta p = p_a$ 。当 $p_{close} < p_a < p_{open}$ 时,会出现两种情况,第一种是蓄能器处于充油过程(气体压缩过程), $\Delta p = 0$;第二种是蓄能器处于放油过程(气体膨胀过程), $\Delta p = p_a$ 。马达输出转矩 T_m 为:

$$T_m = \frac{\Delta p q_m \eta_m}{2\pi} \quad (8)$$

式中: η_m 为液压马达机械效率。

液压马达和永磁发电机的转矩平衡方程为:

$$T_m = J \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + T_e + T_f \quad (9)$$

式中: J 为马达转动惯量, 单位 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; ω_m 为马达转动角速度; B_m 为马达轴上的粘性阻尼系数; T_f 为轴系静摩擦力矩; T_e 为永磁同步发电机的转矩。

三相永磁同步发电机, 选择三相正弦模型, 假设电机铁芯的导磁系数恒定不变, 三相绕组完全对称, 永磁体产生的磁场沿气隙周围正弦分布。得到永磁同步发电机的电气模型为^[10]:

$$\begin{cases} u_d = \frac{d\psi_d}{dt} + R_f i_d - \omega_e \psi_q \\ u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + R_f i_q + \omega_e \psi_d \end{cases} \quad (10)$$

式中: ψ_d 和 ψ_q 可以表示为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (11)$$

发电机的电磁转矩为:

$$T_e = 1.5u(\psi_f i_d + (L_d - L_q)i_d i_q) \quad (12)$$

式(10)~式(12)中: u_d 和 u_q 分别为 d 轴和 q 轴的电压; ψ_d 和 ψ_q 以及 ψ_f 分别为 d 轴和 q 轴以及转子的磁通量幅值; i_d 和 i_q 分别为 d 轴和 q 轴电流; R_f 为发电机定子线圈绕组的电阻; ω_e 为发电机角速度。发电机的线电压为:

$$U = 7.69NKu\phi n / 60 \quad (13)$$

对于电阻负载模型, 永磁同步发电机所接的负载为电阻负载, 阻值为 R , 发电机功率可以表示为:

$$P_e = U^2 / R \quad (14)$$

3 MATLAB and Simulink 仿真模型

根据第2节中所建立的数学模型, 利用 MATLAB and Simulink 软件对波浪能装置液压转换系统进行仿真实验。首先建立系统的仿真框图, 根据系统的特点和 MATLAB and Simulink 液压仿真软件的特性, 将液压转换系统分成3个子模型, 分别是液学子模型、控制子模型、发电子模型。液压蓄能子模型包括液压缸、单向阀组和蓄能器组和液压马达等, 建立的仿真框图如图2所示。

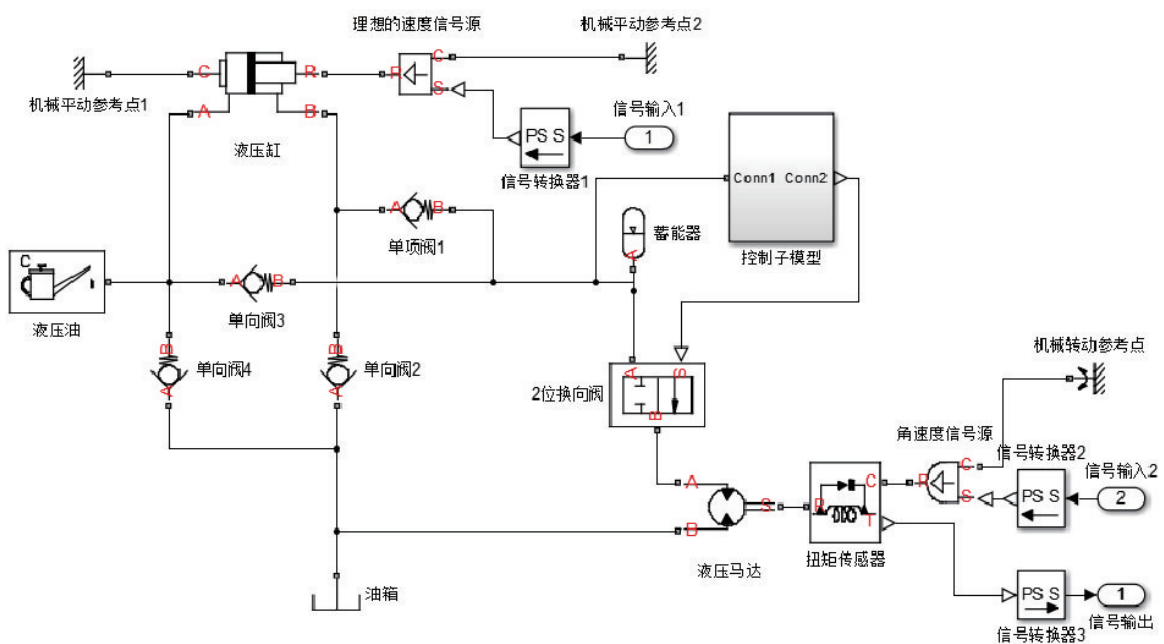


图2 液学子模型 MATLAB and Simulink 模型框图

对于控制子模型,当蓄能器组压力达到设定的开启值时,主油路的液动阀打开,马达开始发电,当蓄能器压力降至设定的关闭值时,液动阀关闭,马达也随之关闭。控制系统都是由液压元件组成,没有电力电子元件,减少控制器在恶劣海洋环境下的故障,确保系统可以稳定的工作,这部分与其他采用液压式转换系统的波浪能装置有所不同,

控制子模型的 MATLAB and Simulink 框图如图 3 所示。

发电子模型包括永磁同步发电机和负载, MATLAB and Simulink 模型如图 4 所示。将建好的液压、控制和发电子模型连接,得到能量转换系统的模型框图,设定仿真时间及相关参数,进行仿真。

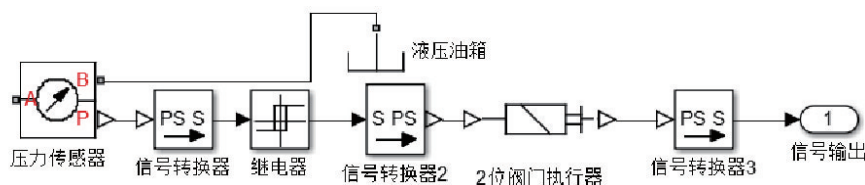


图3 控制子模型 MATLAB and Simulink 模型框图

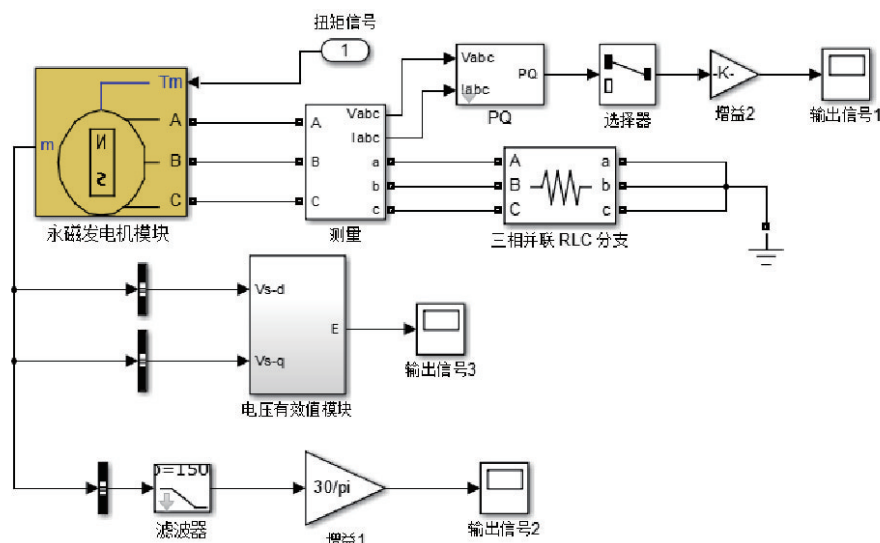


图4 发电子模型 MATLAB and Simulink 模型框图

4 实海况系统和仿真结果对比

为了验证仿真的效果,将仿真数据和波浪能装置实海况实验所得数据进行比较。设置实验参数如下,蓄能器容量为 500 L,设置液压自治控制器启动压力为 16 MPa,关闭压力为 9 MPa,负载电阻为 $6\ \Omega$,液压马达排量为 107 mL/r,额定转速 1 500 r/min,发电机额定电压 400 V。仿真时液压马达容积效率取 93%,总效率取 90%^[11]。

得到的实海况实验结果和仿真结果如图 5 至图 7 所示。图 5 是实验得到和仿真得到的发电机

功率曲线,两条曲线基本重合,实海况实验的发电平均功率为 17.658 kW,仿真的平均功率为 19.46 kW,二者之间的相对误差为 9.26%。图 6 所显示的是液压马达的流量曲线,实验得到的平均流量为 0.002 21 m³/s,仿真得到的平均流量为 0.002 163 m³/s,实验和仿真的相对误差为 2.12%。图 7 所示的是发电机电压的曲线,实验所测的电压平均值为 320.69 V,仿真的电压平均值为 337.71 V,电压的相对误差为 5.03%。

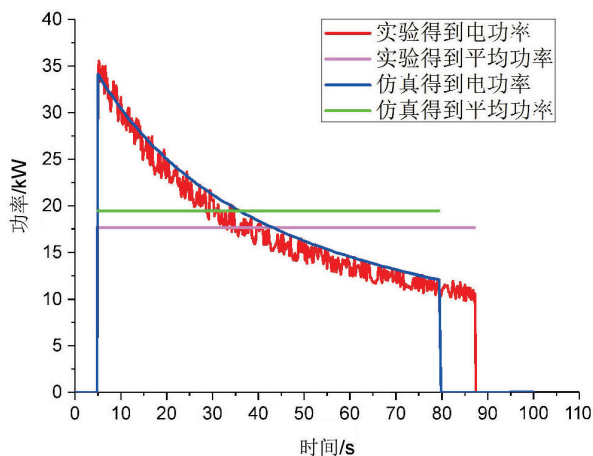


图5 实验和仿真得到的功率曲线

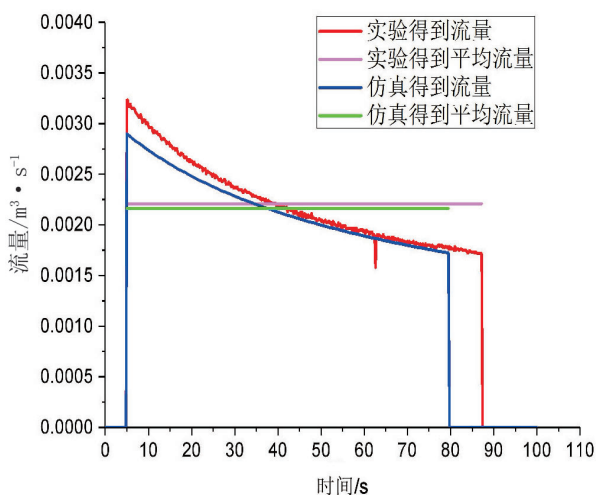


图6 实验和仿真得到的流量曲线

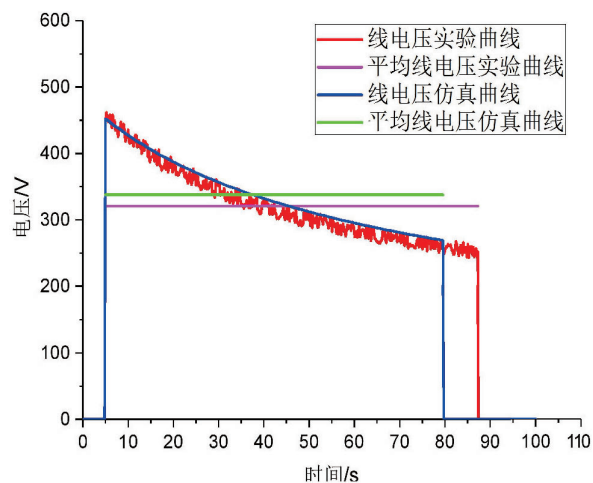


图7 实验和仿真得到的电压曲线

通过得到的发电功率、液压马达流量以及蓄能器的压力等数据,通过液压发电端的效率公式(15)可以计算液压系统的转换效率。式中: P_i 为录得功率数据; $\Delta t_{1,i}$ 为两个功率数据之间时间步长; Q_i 和 $p_{a,i}$ 分别为录得的流量和功率数据; $\Delta t_{2,i}$ 为录得流量和压力数据的时间步长。

$$\eta = \frac{\sum_i^n P_i \Delta t_{1,i}}{\sum_i^m Q_i p_{a,i} \Delta t_{2,i}} \quad (15)$$

通过计算得到,实型波浪能装置液压系统实验液压到电的效率为 69.29%,模拟仿真得到的液压到电的效率为 76%。

5 规则波和随机波下仿真及结果分析

为了研究不同波浪条件下液压能量转换系统的发电特性。本文分别做了随机波和规则波下的能量转换系统仿真。为了缩短仿真时间,修改了第4节的仿真参数,将蓄能器的容量改为 100 L,液压马达排量改为 65 mL/r,阻值改为 8 Ω 。给液压缸端施加两组不同的输入信号来模拟波浪,一组是不规则的随机速度信号,模拟不规则波浪,如图8所示,另一组是规则的正弦信号,模拟规则波,如图9所示。

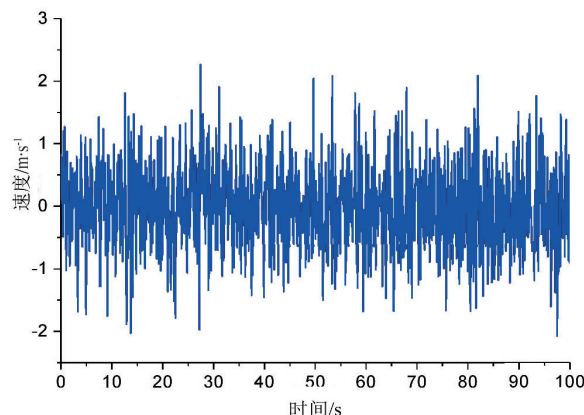


图8 随机速度信号

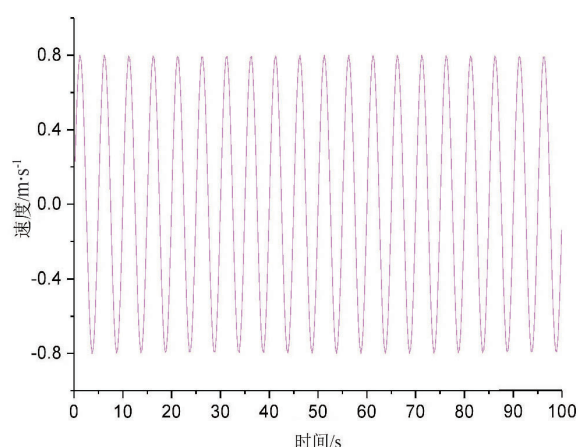


图9 正弦速度信号

仿真时间为 100 s, 得到液压缸有杆腔和无杆腔的流量如图 10 和图 11 所示, 通过液压缸的流量曲线可以看出, 液压缸的流量基本和输入的信号相一致。

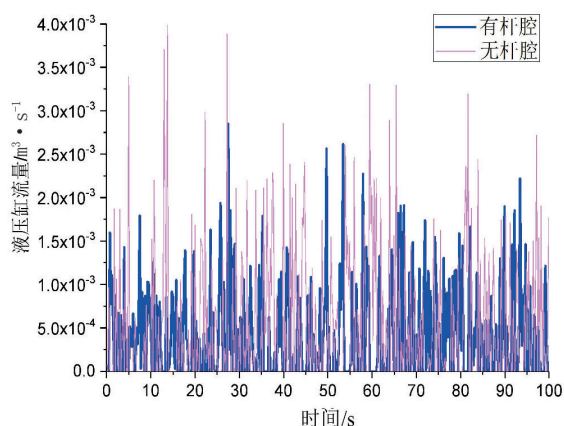


图10 随机信号下的液压缸流量

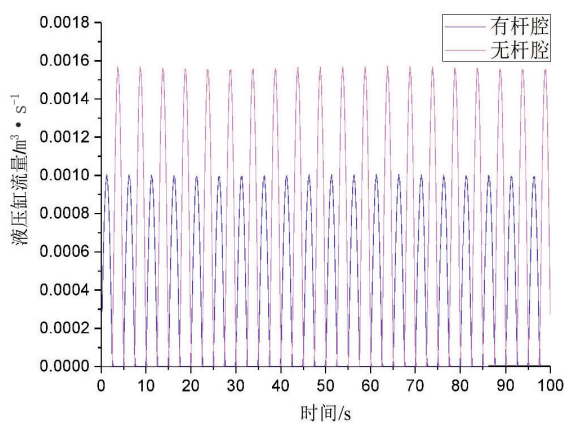


图11 正弦信号下的液压缸流量

图 12 所示的是蓄能器中的压力 p_a 在两种不同的输入信号下的变化曲线, 从图 12 可以看出, 经过蓄能稳压之后, 两组工况下蓄能器的压力值都在所设定的启动压力 p_{open} 和关闭压力 p_{close} 之间波动。

图 13 至图 15 所示的是两组工况下发电特性曲线图, 分别为功率, 转速和电压。从图 13 得到, 两组信号下最大的发电功率值约为 26.6 kW, 最小发电功率为约为 8.88 kW, 并且两个工况下在系统进行发电时功率、马达转速和发电电压曲线基本平行, 曲线的趋势和走向也基本一致, 说明经过蓄能稳压之后, 系统的发电功率与输入的信号已经基本没有什么关联性。

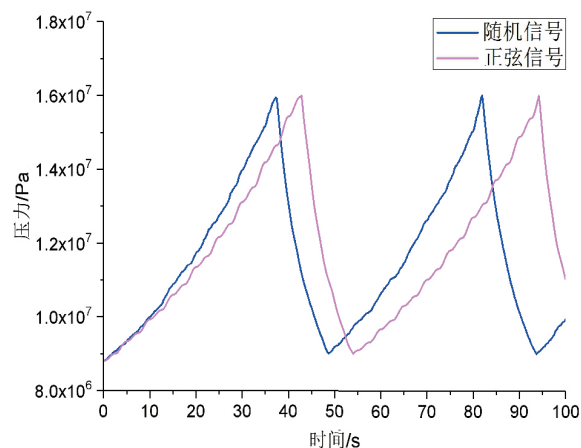


图12 两组工况下的蓄能器的压力

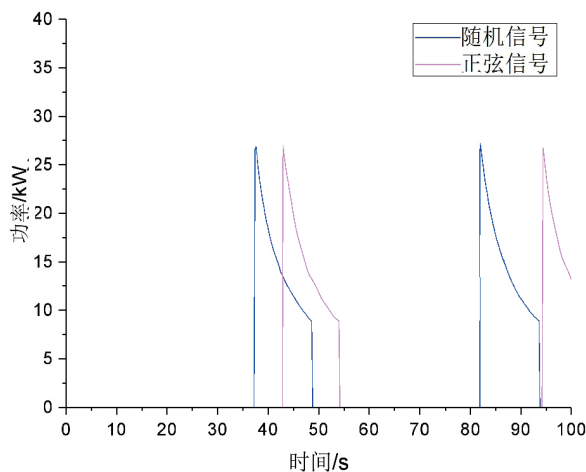


图13 两组工况下发电功率

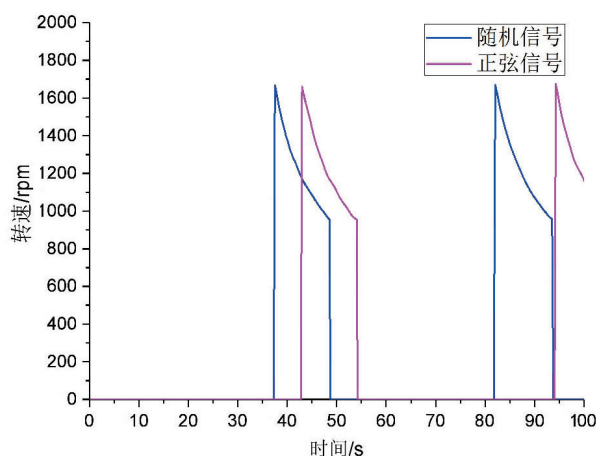


图14 两组工况下液压马达转速

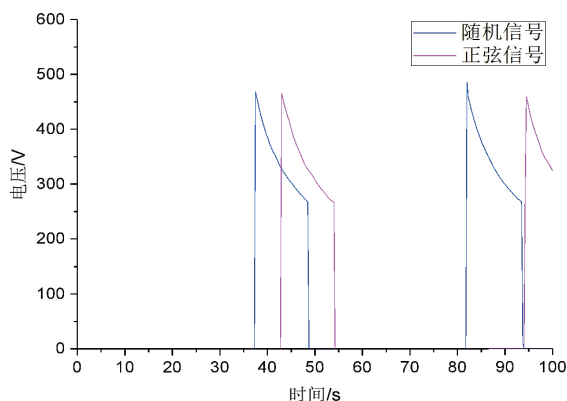


图15 两组工况下发电机电压

6 结 论

本文研究了带有蓄能环节和液压自治控制器的波浪能装置液压能量转换系统,通过对系统的建模仿真研究,得到以下研究结论:(1)将波浪能装置实海况实验与仿真结果对比,二者得到液压能量转换系统的发电特性(包括发电功率、液压马达的流量和发电机电压)基本一致,实验和仿真的相对误差分别为9.26%、2.12%和5.03%。此外通过计算得到了实验和仿真的液压到电的效率分别为69.29%和76%,验证了本文仿真模型的准确性;(2)通过模拟不同的波浪信号输入,经过液压能量转换系统,在启动压力和关闭压力设定的情况下,模拟随机波和规则波输入得到的发电特性基本相似,意味着通过本文所设计的液压能量转换系统,可以将不稳定的波浪能转换成稳定的电能,最终输出的电力特性曲线与输入的波浪特性关联性已经不大,输出的功率和电压比较稳定,提高了发电质量,从而使发电机后端的电力变换更为方便。

参考文献:

- [1] Liu Y, Li Y, He F, et al. Comparison study of tidal stream and wave energy technology development between China and some Western Countries[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 76:701-716.
- [2] 王立国,游亚戈,张亚群,等.波浪能发电装置动力摄取系统研究进展[J].机床与液压,2013,41(1):165-168.
- [3] Wang L, Isberg J, Tedeschi E. Review of control strategies for wave energy conversion systems and their validation: The wave-to-wire approach[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 81:366-379.
- [4] Lasa J, Antolin J C, Angulo C, et al. Design, construction and testing of a hydraulic power take-off for wave energy converters[J]. Energies, 2012, 5(6):2030-2052.
- [5] Henderson R. Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter[J]. Renewable Energy, 2006, 31(2):271-283.
- [6] Kramer M M, Marquis L, Frigaard P. Performance evaluation of the wavestar prototype[C]//The 9th European Wave and Tidal Energy Conference: EWTEC,2011.
- [7] Falnes J, Lillebekken P M. Budal's latching-controlled-buoy type wave-power plant[J]. 2003:233-244.
- [8] 盛松伟,张亚群,王坤林,等.“鹰式一号”波浪能发电装置研究[J].船舶工程,2015(9):104-108.
- [9] 应有.海流能发电装置电液控制系统研究[D].杭州:浙江大学,2008.
- [10] 王坤林.基于海岛直流纳电网波浪能发电场关键技术研究[D].广州:华南理工大学,2015.
- [11] 陆望龙.液压马达选用与维修手册[M].北京:化学工业出版社,2011.

Simulation Study on Hydraulic Energy Conversion System of Wave Energy Device Based on MATLAB and Simulink

YE Yin^{1,2,3,4}, SHENG Song-wei^{1,2,3,4}, YUE Wan-zhen^{1,2,3,4}, WANG Kun-lin^{1,2,3,4}, ZHANG Ya-qun^{1,2,3,4}

1. *Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;*

2. *Key Laboratory of Renewable Energy, Chinese Academy Sciences, Guangzhou 510640, China;*

3. *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China;*

4. *Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China*

Abstract: The hydraulic energy conversion system is one of the most widely used energy conversion methods in wave power generation devices. The model simulation study of the wave energy hydraulic energy conversion system is carried out is the porper. The mathematical model of the wave energy hydraulic energy conversion system is established with energy storage pressure stabilization system and hydraulic autonomous controller. Based on the established mathematical model, the MATLAB and Simulink simulation block diagram of the hydraulic conversion system of the wave energy device is built, and the system is simulated. The power generation data obtained from the real sea state experiment are compared with the simulation data. The results show that the relative error between the two is small. The accuracy of this simulation model is verified. In addition, the power generation characteristic curve of the hydraulic energy conversion system under the input of regular and random waves is also simulated. The simulation results show that the output power generation characteristics are relatively stable regardless of whether it is a regular wave or a random wave after passing through the hydraulic energy conversion system. The energy conversion system is used to convert unstable wave energy into stable electrical energy, improve the quality of power generation, and provide convenience for subsequent power transmission and grid connection.

Key words: wave energy; hydraulic system; power generation characteristics; energy conversion; autonomous control; simulation model