

Power Conversion and Controlling System of the Wave Energy Generation Device

Guangxin Gong, Jiaming Zhang, Shuting Huang

College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao
Email: gongguangxin1126@163.com

Received: Mar. 19th, 2014; revised: Apr. 9th, 2014; accepted: Apr. 21st, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

With the depletion of traditional energy sources, the development of new energy has become the current trend. In the scale of marine renewable energy, wave energy is favored and has been exploited by a wide range of energy generation equipments on a roughly same basis of generation aspects. Based on a new hydraulic wave energy device which is a combination of oscillation floats, this paper aims to explore its power conversion and controlling system, to describe its efficiency of solving several important technical problems briefly, and to make a contribution to the integration and scalization of wave energy generation facilities.

Keywords

Wave Energy, The Combination of Oscillating Floats, Power Conversion, Controlling System

波浪能发电装置的电力变换和测控系统

宫广新, 张家明, 黄淑亭

中国海洋大学工程学院, 青岛
Email: gongguangxin1126@163.com

收稿日期: 2014年3月19日; 修回日期: 2014年4月9日; 录用日期: 2014年4月21日

摘要

随着传统能源的枯竭，新能源的开发成为时代的潮流，海洋可再生能源中的波浪能备受青睐，波浪能发电装置也是各式各样，但发电的基本环节大致相同，本文在一种液压式新型波浪能发电装置——组合型振荡浮子波浪发电装置基础上，探讨其电力转换和测控系统，简要阐述了该系统解决的几个重要的技术难题，为波浪能发电装置走向集成化、规模化探索道路。

关键词

波浪能，组合型振荡浮子，电力变换，测控系统

1. 引言

随着地球上传统能源的告急，可再生能源在世界舞台上的角色越来越重要，而占地球总面积 71% [1] 的海洋蕴藏着极大的能量的事实正在被世人逐步地发现。波浪能是海洋能中所占比重较大的可再生能源，海水的波动蕴藏着极其丰富的能量，主要是机械能。据估计，世界海洋中的波浪能理论储量可达 30 亿千瓦 [2]。我国近海的波浪能资源也相当丰富，但总体特征是周期较短、波高较小、能流密度较低 [3]，波浪能开发技术亟待突破，才能实现规模化、商业化。

虽然波浪能开发技术复杂、成本高、投资回收期长，但是近 100 年 [4] 来，世界各国还是投入了很大的力量进行探索和研究。除实验室研究外，英国、挪威、印度、日本、美国、葡萄牙等国家相继开发波浪能发电装置，研究各种各样的波浪能发电高新技术 [5]。大规模的波浪能发电在成本方面还难与常规能源发电竞争，但特殊用途的小规模发电，已经在航标灯、独立灯塔、灯桩等装置上获得推广应用。在独立海岛供电方面，小型波浪发电装置发电已经可以与柴油机发电机组发电竞争 [6]。

波浪能作为一种优点较多的可再生能源，也有其缺点，即随机性强不稳定。利用波浪能发出的电能到给用户使用中间的技术环节十分重要，那么电力变换和测控系统就是波浪能与用户之间的桥梁，是海洋能开发利用必不可少的环节。波浪能发电装置就是将波浪蕴藏的丰富的机械能通过中间转换过程来产生电能，按照能量转换中间环节分为机械式、气动式、液压式、直驱式四大类 [6]，本文以液压式组合型振荡浮子为例介绍电力变换和测控系统的优越性。

2. 波浪能发电装置

液压式波浪能发电装置将波浪能转换为电能通常要经过三级转换，第一级转换是波浪的机械能被捕能装置“捕获”后变为捕能装置的机械能，第二级转换是捕能装置的机械能转换为中间转换系统的液压能，液压能再转换为液压马达的机械能，第三级转换是液压马达驱动发电机产生电能 [7]。目前波浪能发电装置的主要工作原理基本相同，不同的只是转换效率的问题。

组合型振荡浮子波浪能发电装置(单个浮子示意图如图 1 所示)是一种新型波浪能发电装置，主要构件有潜浮体、四个浮子、液压系统、发电系统、控制液压缸位置的四台异步电机等，其工作原理如下：四组浮子在波浪作用下，沿装置支撑系统的立柱做上下运动，浮子捕获波浪能转化为自身的动能，此时完成能量的一级转换；浮子带动安装在其上方的液压缸活塞运动，推动油缸内液压油，将机械能转化为液压能，再经过液压系统内转化、平衡、稳压后驱动液压马达，将液压能转化为机械能，此时形成能量的二级转换；最后液压马达驱动发电机发电，机械能转化为电能，完成能量的三级转换。该装置的能量转换

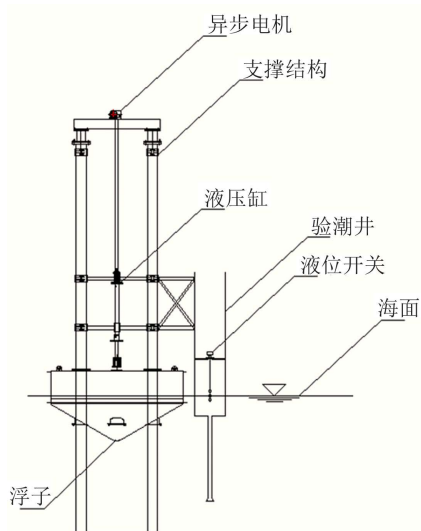


Figure 1. Description of one float in the wave energy generation device with combination of oscillation floats

图 1. 组合型振荡浮子波能发电装置(一个浮子)示意图

效率较振荡水柱装置有显著的提高，是一种非常有发展前景的波浪发电装置[8]。

电力变换和测控系统是该装置的核心，决定了装置的转换效率，同时也决定了装置是否能够安全稳定运行，本文将重点介绍配备在该装置上的电力转换和测控系统。

3. 电力变换和测控系统

目前，国内外海洋能研究机构研究重点大多在捕能装置和能量转换装置上，较多地研究如何提高能量转换效率，较少地涉及装置的自动控制等环节，因此，许多研究结果均是在较为理想的数值模拟条件或实验室条件下得到的，并非都是实际海试的结果。本文所介绍的电力转换和测控系统正是基于实际海况条件下研究出来的，是保证装置在实际海况下安全运行的关键。

3.1. 电力变换系统拓扑结构总体设计

电力变换系统拓扑结构图如图 2 所示。

在该电力变换系统中，额定输出功率为 15 kW 的三相同步永磁发电机在实际运行时输出的三相交流电，首先接入 WWS-150-360-N01 蓄电池充电控制器进行整流、滤波、稳压等环节，然后将控制器输出的直流母线电压加在 360 V 蓄电池组两端对蓄电池进行充电。与此同时，将直流母线电压接入 WI100-360-CM01 离网正弦逆变器，逆变器会将直流母线电压逆变成三相 380 V 交流电以供给单相和三相交流负载使用。

为保证整个电力变换系统的可靠、安全运行，在 WWS-150-360-N01 型控制器的三相进线处安装了 40 kA 的浪涌保护器(也称避雷器)以消除雷电对系统的影响，也可对其他瞬时过压的电涌进行抑制。除此之外，整个系统还在多处加装了直流、交流断路器，便于整体施工和系统的分级调试。

WWS-150-360-N01 型控制器适合于高温、低温等相对恶劣的工作环境并具有可靠的性能和使用寿命，能实时控制发电机对蓄电池进行安全高效地智能充电。当蓄电池的电压大于设定的浮充电压点时，控制器采用 PWM 限压充电模式，控制器将多余电能分为上千个阶段进行卸载，通过卸荷电阻一边对蓄电池

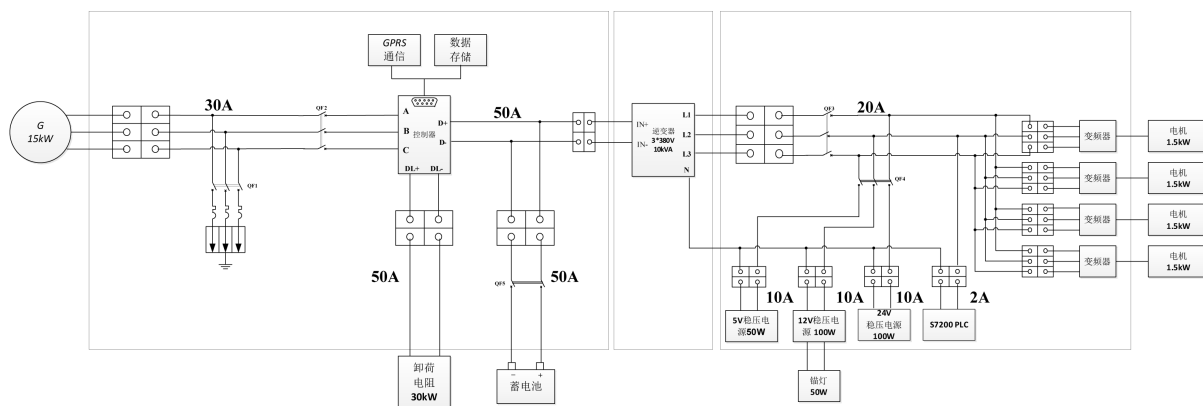


Figure 2. The topology diagram of power conversion system

图 2. 电力变换系统拓扑结构图

充电一边把多余的能量卸除，有效地延长了蓄电池的使用寿命；控制器具备完善的保护功能：蓄电池过充、过放、防反接保护；防雷保护等。数据存储模块可通过 SD 卡存储系统运行的历史数据。

WI100-360-CM01 离网正弦逆变器具有交流自动稳压输出功能，整机效率高，空载损耗低，相对于方波或修正正弦波(阶梯波)具有更强的带负载能力。逆变器同样具备完善的保护功能：蓄电池过压、过放电、防反接保护；输出过载、短路、过热保护；防雷保护等。该电力变换系统中，逆变器输出的单相 220 V 交流电用于供给 5 V/50 W、12 V/100 W 和 24 V/100 W 三种规格的直流稳压电源以及可编程控制器(以下简称 PLC)；逆变器输出的三相 380 V 交流电用于供给 4 台额定功率为 1.5 kW 的三相交流异步电动机，用于 4 台螺旋升降器的电力拖动。考虑到电动机启动瞬间的过大启动电流会对逆变器产生较大的冲击，故 4 台交流电动机均由变频器来驱动，这样可以通过设置变频器的相关参数来限制启动电流，达到“软启动”的效果。同时可以利用变频器来控制电机的启停方式、正反转、加/减速时间等。

3.2. 系统运行本地测控系统总体设计

测控系统的总体要求是在系统运行时对整个电力变换系统的各项电参数，包括发电机输入线电压、发电机输入线电流、发电机输入功率、蓄电池充电电压、蓄电池充电电流、蓄电池荷电状态、卸荷电阻箱电压、卸荷电流、直流母线电压、直流母线电流、逆变器输出线电压、逆变器输出线电流、逆变器输出功率、逆变器输出单相电压、逆变器输出单相电流等，以及运行环境的温湿度进行实时采集、实时存储、实时显示，进而对系统当前状态进行评估，确定下一步的控制工作。

按照测控系统的总体要求，系统中安装多路交流、直流电压/电流变送器，以便将实际的工程参数转换成 4~20 mA 标准直流信号。图 3 为电力变换系统电气原理图，图中标出了 13 路电压/电流变送器的安装位置。对于环境温度，采用引线式三线制 Pt100 温度传感器进行检测，而对环境的湿度则采用 MKASL-3 湿度变送器进行检测。

表 1 列出了电力变换系统中用到的所有类型的传感器和变送器的型号、量程、被测参数等信息。

交流、直流电压/电流变送器、Pt100 温度传感器和湿度变送器的输出模拟信号(共 16 路)接入 RX4116A 宽屏蓝色无纸记录仪，记录仪的采样周期为 2 秒。采集的数据存储在记录仪内部的 NAND Flash 存储器中，并能以曲线、工程量和百分量等多种形式进行实时显示或历史查询。RX4116A 记录仪支持 U 盘作为外部存储介质，可将保存在 NAND Flash 存储器中的历史数据或组态配置通过 U 盘进行转存。

转存在 U 盘中的历史数据可以通过上位机数据管理软件读出。数据的显示形式有历史数据曲线和历史数据表两种。图 4~图 11 分别为历史数据曲线的显示界面，数据来源为实际进行电力变换系统连续四天

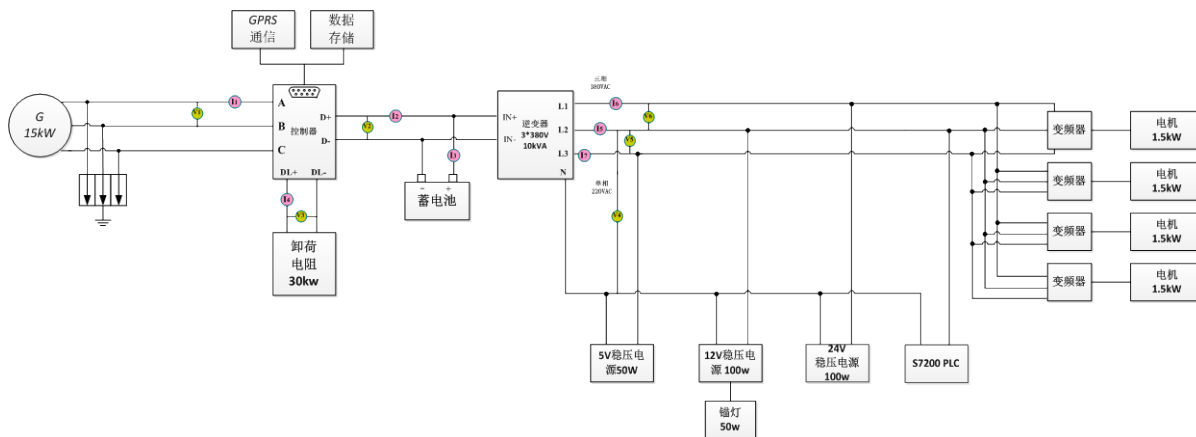


Figure 3. The electricity schematic diagram of power conversion system
图 3. 电力变换系统电气原理图

Table 1. The relevant information of sensor and transmitter
表 1. 传感器、变送器相关信息

标号	型号	被测参数	量程	单位
V1	CHY-1000VT/A1	发电机出线电压	0~1000	V(AC)
V2	CHZ-600VD/A1	蓄电池电压	0~600	V(DC)
V3	CHZ-400VD/A1	卸荷电阻电压	0~400	V(DC)
V4	CHY-300VS/A1	逆变器输出单相电压	0~300	V(AC)
V5	CHY-500VS/A1	逆变器输出 BC 线电压	0~500	V(AC)
V6	CHY-500VS/A1	逆变器输出 AB 线电压	0~500	V(AC)
I1	CHY-30AS/A1	发电机出线电流	0~30	A(AC)
I2	CHZ-50G/A1	直流母线电流	0~50	A(DC)
I3	CHZ-50G/A1	蓄电池充电电流	0~50	A(DC)
I4	CHZ-50G/A1	卸荷电阻电流	0~50	A(DC)
I5	CHY-20AS/A1	逆变器输出线电流 1	0~20	A(AC)
I6	CHY-20AS/A1	逆变器输出线电流 2	0~20	A(AC)
I7	CHY-20AS/A1	逆变器输出线电流 3	0~20	A(AC)
T1	Pt100	环境温度 1	-50~200	°C
T2	Pt100	环境温度 2	-50~200	°C
H1	MKASL-3	环境湿度	0~100	%

测试实时数据。

3.3. 小结

该波浪能发电装置的电力变换部分主要包括整流、滤波、稳压、蓄电池程控充电、逆变等功能，对电能转换和利用环节进行了深入的和计算，保证了发电电能的高效储存和负载的电能消耗。测控部分主要包括系统关键节点变送器的数据采集、显示和存储，PLC 的逻辑控制，使得系统协调性、稳定性更高。工作原理是：四个振荡浮子随着波浪上下运动，将波浪能转换为液压能驱动液压马达继而驱动发

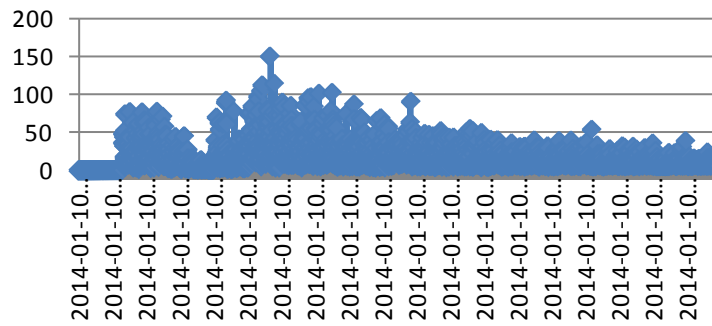


Figure 4. The line voltage of the generator on January 10, 2014

图 4. 2014.01.10 发电机线电压

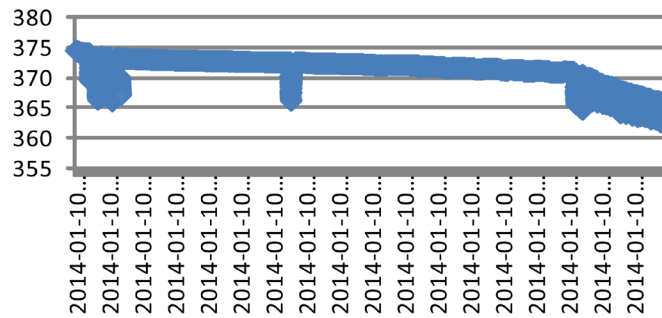


Figure 5. The voltage of the accumulator on January 10, 2014

图 5. 2014.01.10 蓄电池电压

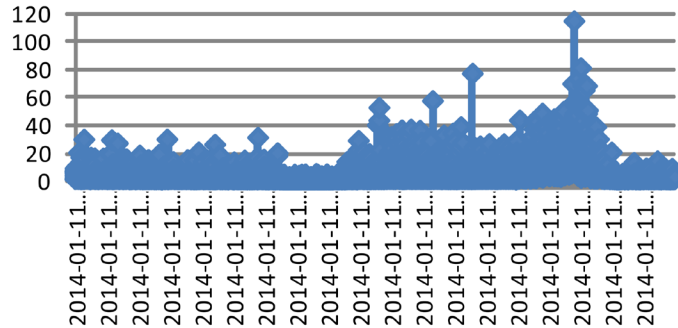


Figure 6. The line voltage of the generator on January 11, 2014

图 6. 2014.01.11 发电机线电压

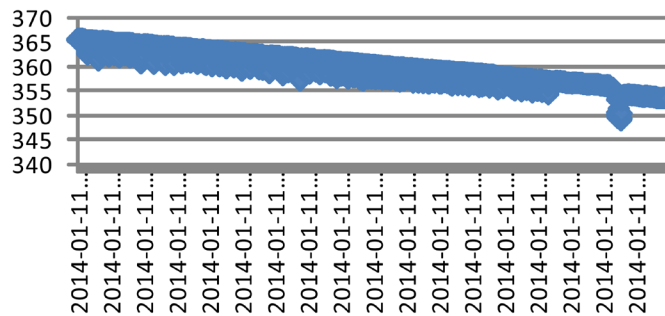


Figure 7. The voltage of the accumulator on January 11, 2014

图 7. 2014.01.11 蓄电池电压

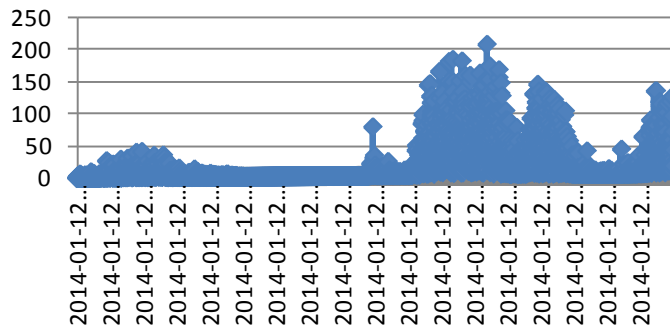


Figure 8. The line voltage of the generator on January 12, 2014
图 8. 2014.01.12 发电机线电压

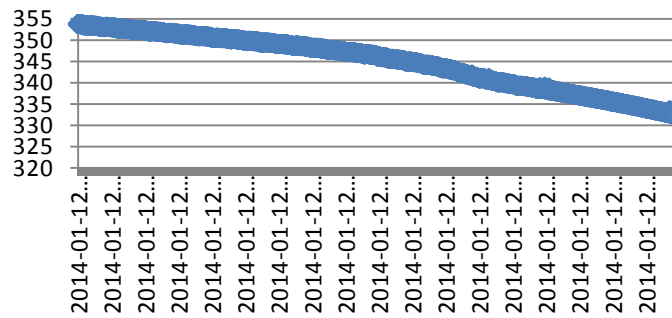


Figure 9. The voltage of the accumulator on January 12, 2014
图 9. 2014.01.12 蓄电池电压

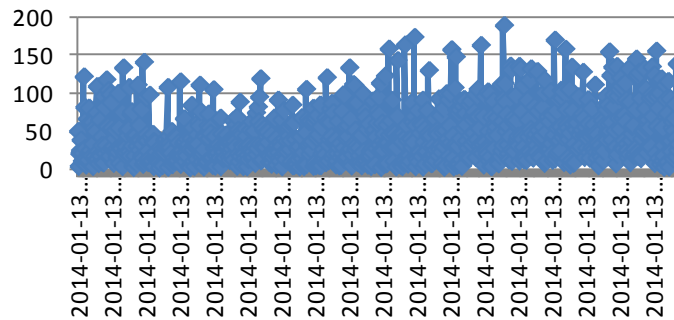


Figure 10. The line voltage of the generator on January 13, 2014
图 10. 2014.01.13 发电机线电压

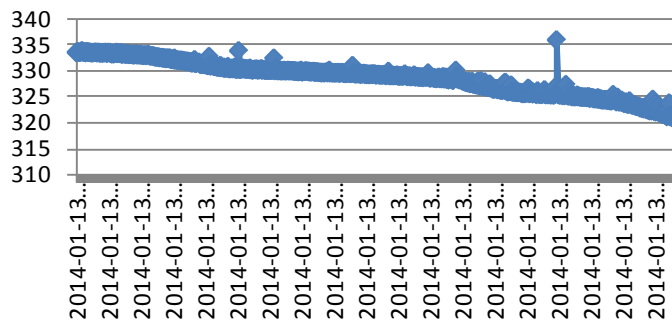


Figure 11. The voltage of the accumulator on January 13, 2014
图 11. 2014.01.13 蓄电池电压

电机，产生不稳定的三相电能。产生的不稳定的三相电能通过整流、滤波和稳压等环节后可以给蓄电池充电从而储存电量，也可将蓄电池中的电量经逆变电路得到稳定的三相电能供给系统负载工作。本文第四部分将重点介绍该电力变换和测控系统解决的该波浪能装置的技术难题。

4. 电力变换和测控系统解决的技术难题

振荡的浮子随波浪上下运动，浮子直接连接液压缸转化为液压能，而波浪是随机的不稳定的，浮子上下运动的振幅就不稳定，液压缸的行程是有限的，如果液压缸固定的位置与静水条件下浮子的距离不合适则可能导致顶缸或脱缸现象的出现，威胁到装置的安全。

为解决上述技术难题，在液压缸上安装验潮井，验潮井内安装连杆浮球液位开关(图 12)。验潮井利用的连通器原理，验潮井内的液位只会随着潮位的变化而变化，瞬时的波浪不会影响验潮井内的液位。具体工作流程如下：

波浪能发电装置共安装验潮井两个，分别命名为 A、B，验潮井固定于液压缸三角腿支架上，与液压缸缸体同步运动。

每个验潮井内部，安装一个连杆浮球液位开关，液位开关共设置浮球 3 个，从上至下编号为①、②、③。密闭的连杆内部设置 3 个磁簧开关，浮球内部装有环形磁铁，固定环控制浮球与磁簧开关在相关位置上，使浮球在一定范围内上下浮动。浮球内的磁铁吸引磁簧开关的接点，可产生开与关的动作。我们规定浮球在自重作用下接触下固定环的状态为常开(NO)，浮球在浮力作用下脱离下固定环浮起后的状态为常闭(NC)。

将安装在验潮井 A 中的液位开关简称为液位开关 1 号，将安装在验潮井 B 中的液位开关简称为液位开关 2 号。

发电装置工作伊始，调整验潮井 A、B 高度，使其中的浮球②③受浮力作用浮于水中，①因重力接触下固定环，此时 3 个浮球状态依次为 NO、NC、NC(见图 13)。在 PLC 的控制逻辑中，默认首先使用液位开关 1 号给出的开关信号而屏蔽液位开关 2 号的开关信号。

涨潮，验潮井内水位上升，至上升一定距离 L 时，①浮起脱离下固定环，①状态首次由 NO 转为 NC 时，触发螺旋升降器带动液压缸缸体和验潮井向上移动，见图 14。

直至验潮井上升至浮球②重新露出水面，②状态首次由 NC 转为 NO 时，触发螺旋升降器停止运动，见图 15。

落潮，验潮井内水位下降，至下降 L 时，③逐渐露出水面，③状态首次由 NC 转为 NO 时，触发螺旋升降器带动液压缸缸体和验潮井向下移动，见图 16。

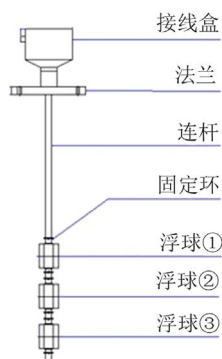


Figure 12. Description of level switch
图 12. 液位开关示意图

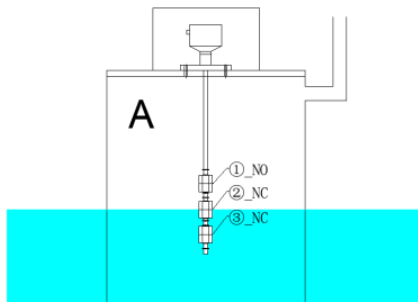


Figure 13. Initial station of level switch
图 13. 液位开关初始状态

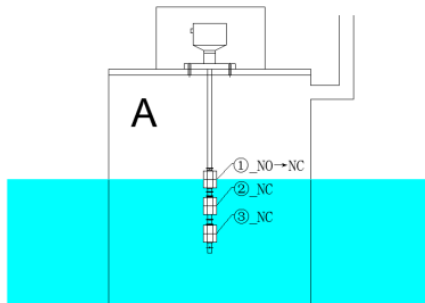


Figure 14. The growth of tide L triggers the rise of the spiral lifter
图 14. 潮位上涨 L, 触发螺旋升降器上升

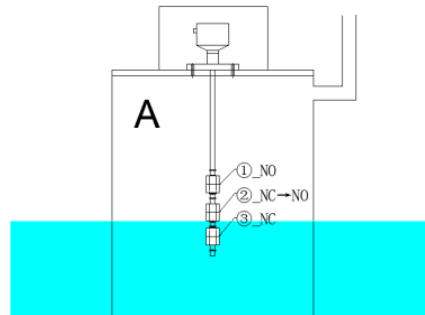


Figure 15. The spiral lifter stops rising
图 15. 触发螺旋升降器停止上升状态

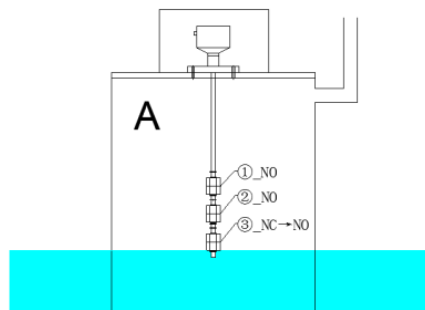


Figure 16. The decline of tide L triggers the fall of the spiral lifter
图 16. 潮位下降 L, 触发螺旋升降器下降

直至验潮井下降至浮球②重新浮于水面上，②状态首次由 NO 转为 NC 时，触发螺旋升降器停止运动，见图 17。

不考虑验潮井内水位波动及装置整体晃动的情况，当液位开关有如图 18 的信号输出时，便认为水位达到了调整状态。

由于液位开关两浮球之间的行程为 L ，即每当潮水上升(或下降) L (第一次上升除外)时触发磁簧开关，使得螺旋升降器上升或下降。由于螺旋升降器上升(或下降)的速度为 v ，故螺旋升降器抬升(或降低)整个装置 L 需要时间 t ，为排除故障信号对 PLC 的影响，需做出超时检验，即 PLC 控制螺旋升降器上升(或下降)开始后约 $2t$ 时间内仍没有检测到使得 PLC 停止控制螺旋升降器上升(或下降)的信号，自动停止螺旋升降器，同时在 PLC 程序中将标志液位开关 1 号的标志位清零，将标志液位开关 2 号的标志位置 1，这样做的效果就是把已经出现故障的液位开关 1 号的错误开关信号屏蔽掉，然后只是用液位开关 2 号的开关信号。

另外，异步电机启动时负载电流较大，为避免逆变器负载过大，程序设计使异步电机逐个启动，图 19 是某时段异步电机启动过程中逆变器输入电流数据。每个提升大约 170 秒。可看出每个升降器提升时电流保持在 10 A 左右。

经过周密的设计，潮位的变化使得液位开关的三个浮球逻辑改变，通过浮球与上下固定环的“离与合”控制电路的“通与断”，PLC 以此来判断输出提升或下降信号来驱动异步电机的运转，提升或下降液压缸，从而保持液压缸和浮子的一定的相对位置，避免了顶缸和脱缸现象的出现，保证了装置的稳定性。

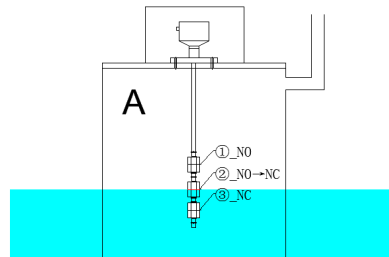


Figure 17. The spiral lifter stops falling
图 17. 触发螺旋升降器停止下降状态

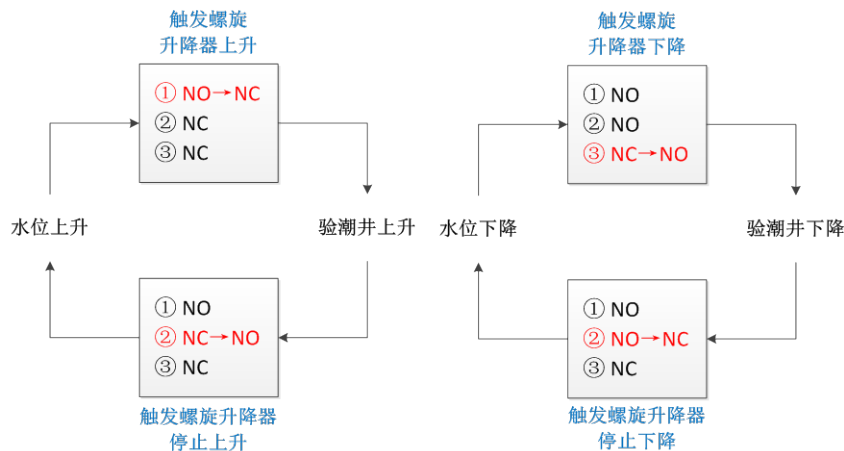


Figure 18. The triggering signal
图 18. 触发信号示意

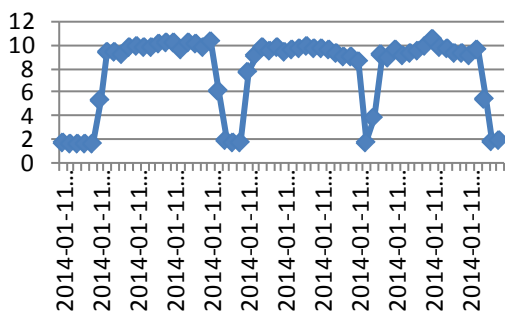


Figure 19. The input current of the inverter
图 19. 逆变器输入电流

5. 结论

组合型振荡浮子发电装置是在振荡浮子发电装置基础上的创新，其转换效率相对提高，系统的可靠性因其巧妙设计的自动控制系统而大大提高，较为符合我国未来波浪能发电装置的发展趋势。其电力变换和测控系统的设计较为符合我国波能资源特征，同时使发电系统与自动控制系统“无缝衔接”，尤其是潮差自动控制系统，保证了整个装置的安全运行。装置发出的电能不仅可以为蓄电池充电，还可以经过逆变供系统负载工作，保证了系统在实际海况下稳定运行。该电力变换和测控系统在一定程度上加快了波浪能发电装置的集成化、规模化进程，向降低波浪能发电成本迈进了一步。

致 谢

感谢在本文撰写过程中给予无私帮助的史宏达老师、刘臻老师、黎明老师及崔莹同学，尤其是赵环宇师兄前期总结的一些资料对本文的帮助尤为重要，感谢本文所有引用资料的所有者，同时感谢国家国际科技交流与合作专项和青岛市战略性新兴产业培育计划项目的支持。

基金项目

本文受到以下两个项目的支持：国家国际科技交流与合作专项(2010DFB64030)；青岛市战略性新兴产业培育计划项目(13-4-1-38-hy)。

参考文献 (References)

- [1] 游亚戈, 李伟, 刘伟民, 李晓英, 吴峰 (2010) 海洋能发电技术的发展现状与前景. *电力系统自动化*, **14**, 1-12.
- [2] 薛坤 (2012) 组合型振荡浮子波能发电装置物理模型实验研究. 硕士学位论文, 中国海洋大学, 青岛.
- [3] 高辉 (2012) 振荡浮子式波浪发电装置最佳功率控制. 硕士学位论文, 华南理工大学, 广州.
- [4] 王忠, 王传崑 (2006) 我国海洋能开发利用情况分析. *海洋环境科学*, **4**, 78-80.
- [5] 张丽珍, 羊晓晟, 王世明, 梁拥成 (2011) 海洋波浪能发电装置的研究现状与发展前景. *湖北农业科学*, **1**, 161-164.
- [6] 聂宏展, 张明, 申洪, 张宏宇 (2013) 波浪能发电及其对电力系统的影响. *华东电力*, **1**, 190-195.
- [7] 孙龙龙 (2012) 基于装置研发的波浪能评估方法研究. 硕士学位论文, 中国海洋大学, 青岛.
- [8] 高人杰 (2012) 组合型振荡浮子波能发电装置研究. 硕士学位论文, 中国海洋大学, 青岛.