

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.09.020

用于海洋仪器供电的低流速海流能发电技术研究

祁长璞¹, 林勇刚², 赵建兴¹

(1. 上海船舶电子研究所, 上海 201108; 2. 浙江大学 流体传动及控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对海洋仪器通常远离海岸线, 远离电网, 传统的电网供电方式实施难度大、成本高昂的问题, 为了满足这一特殊应用需求, 对海流能发电技术中的低流速发电和能量管理两项关键技术进行了研究, 重点解决了机组在低流速下启动和能量管理问题。在理论分析的基础上, 设计制造了一台三叶片叶轮结构、额定功率为 500 瓦的低流速水平轴直驱型海流能发电样机, 并设计了与之匹配的能量管理系统和 PC 机端监控界面。试验结果表明: 机组在低流速时能正常启动, 额定流速时满功率发电; 能量管理系统能实时监测发电系统的各项电气参数, 控制功能响应迅速; 整个系统连续运行稳定、可靠。

关键词:海洋仪器; 海流能; 低流速; 能量管理

中图分类号: TM612; TK73

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)09-1055-05

Ocean current power generation at low flow velocity for oceanographic instruments

QI Chang-pu¹, LIN Yong-gang², ZHAO Jian-xin¹

(1. Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China;

2. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problems that oceanographic instruments are usually far from the coastline and the power grid, traditional mode of power supply from power grid system is difficult and expensive to implement. In order to satisfy the special application requirement of oceanographic instruments power supply, two key technologies of low flow rate power generation and energy management in ocean current power generation technology were studied, the problem of starting at low flow rate and energy management were discussed. Based on the theoretical analysis, a three-blades, horizontal-axis, direct drive marine current turbine with a rated power of 500W was designed and manufactured, furthermore, the matching energy management system and PC monitoring interface were designed. The experimental results show that the generation unit can start normally at low flow velocity and full power generation at rated flow velocity. The electrical parameters of the power generation system are monitored by the energy management system in real time, and the control function is responsive. The whole system is stable and reliable in continuous operation.

Key words: oceanographic instruments; energy of ocean current; low flow velocity; energy management

0 引 言

海洋仪器远离海岸线, 传统的电网供电方式实施难度大。海流能发电技术在海洋仪器供电方面具有先天的优势, 可以就地利用海流资源提供电力供应, 具有

较短的传输距离和较小的能量损耗, 并且成本低、隐蔽性强^[1]。

海洋仪器及其所处的海域通常具有以下特点: (1) 海洋仪器自身的用电负载相对比较小, 因此其供电系统的功率等级也相应较低; (2) 海洋仪器所处的

海域通常流速比较低,要求机组具有低流速下启动和发电的能力;(3)能量就地获取,就地使用,需要一个有效的孤网能量管理系统。

常规以并网售电为目的海流能机组为了尽可能多的输出电能,多选择海流流速较高的海域,输出电能可直接并入电网^[2],而为海洋仪器供电的海流能发电机组则更需要考虑的是低流速发电和离网对海洋仪器稳定供电的能量管理技术。总结起来,用于海洋仪器供电的海流能发电机组需解决两项关键技术:(1)海流能机组低流速发电技术;(2)海流能发电系统能量管理技术。

国内外针对低流速海流能发电技术和海洋仪器供电技术研究甚少。本研究针对海洋仪器供电这一特定的应用领域,对低流速海流能发电技术展开技术研究,试制了一台额定流速为 1 m/s、额定功率为 500 W 的样机,并对其进行海试验证。

1 海流能机组设计

海流能发电系统结构示意图如图 1 所示。

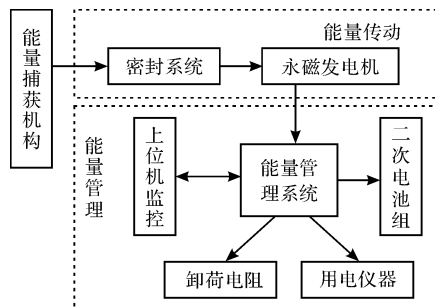


图 1 海流能发电系统结构示意图

按照系统部件功能可将海流能发电系统分解为能量捕获、传动和管理 3 个主要部分。能量捕获和能量传动主要依靠海流能发电机组来完成。

目前国际上海流能发电机组一般采用齿轮传动方式,但齿轮箱的故障是影响机组长时间运行的瓶颈之一^[3]。考虑到海洋仪器安放地点一般海流流速都较低,机组启动需要自身旋转运动机构具有较低的转动惯量和摩擦力矩,因此机组宜采用直驱型传动方式,即叶轮安装在发电机输入轴系上,无其他中间转换环节。发电机组传动轴系的支撑一般有两点支撑和多点支撑等形式,依靠齿轮箱传动的发电机组的轴系支撑通常采用三点式,而直驱型发电机组采用两点式支撑是比较合理的支撑方式,叶轮的轮毂固定安装在主轴上,依靠主轴支撑。支撑主轴的前后两个轴承分别安装在发电机箱体轴承座上。两点式支撑结构简单、紧凑、可靠性高。

海流能发电机组的主轴支撑结构如图 2 所示。

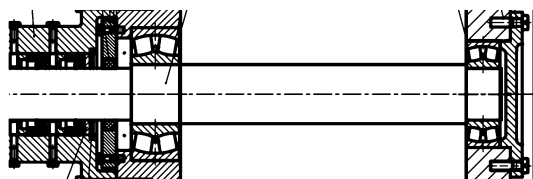


图 2 海流能发电机组主轴支撑结构

左侧为连接三叶片叶轮端,采用多重油封密封形式。

2 低流速叶轮设计

叶轮的设计决定了机组的能量捕获能力和捕获效率。应低流速启动的实际需求,并综合考虑试验海域水深条件和水质状况等客观因素,分析叶轮旋转特性和叶片结构形式对捕获效率的影响,进而完成能量捕获机构的设计和优化。叶轮采用三叶片的结构形式,其优点在于三叶片结构可使海流能发电机组的运行状态和输出功率都比较平稳,同时与二叶片叶轮相比,三叶片叶轮由剪切流引起的对发电机主轴和箱体的稳定载荷更小^[4]。

考虑到失速控制和尽可能高的发电系统总效率需求等因素,机组叶轮直径设计为 2.2 m。叶轮转速设计则充分分析了发电机的效率和体积的关系、直驱型发电机的最佳额定转速下限,并且为了提高叶轮效率,所设计的转速不能使叶尖速比太大^[5],综合考量后叶轮的转速设计为 50 rad/min。同时在发电机设计方面,采用极对数为 24 的永磁同步发电机,确保在低转速下系统输出能达到所需要的额定功率。

机组要在流速低至 1 m/s 的条件下启动和正常发电,因此海流能机组叶轮叶片在保证具有足够强度的前提下,应优先选用具有较大的升阻比的翼型。一方面,升阻比大的翼型,其厚度一般较小,沿拍打方向的结构刚度也较差;另一方面,沿拍打方向刚度好的翼型,因厚度较大导致升阻比较小。

在效率和强度两者充分权衡之下,叶片的翼型选用成熟的 NACA 634XX 系列翼型。该系列翼型升阻比大,并且流体动力学性能优良,在风力发电领域和航空工业领域获得了较为广泛的应用。叶片的叶尖部分所受弯矩载荷较小,应优先选用水动力学性能良好的翼型,因此相对厚度较小的 NACA 63415 翼型是比较合适的翼型;而叶片的叶根部分所受弯矩载荷较大,应优先选用结构强度大的翼型,所以相对厚度较大的 NACA 63430 翼型是比较理想的翼型;叶片的中段选

用 NACA63421 翼型,是结构强度和水动力学性能比较平衡的翼型。

本研究通过经典的叶素动量理论计算^[6],形成叶片的外形尺寸,并通过 CFD 仿真获得叶片的效率曲线。

叶轮的功率系数随流速如图 3 所示。

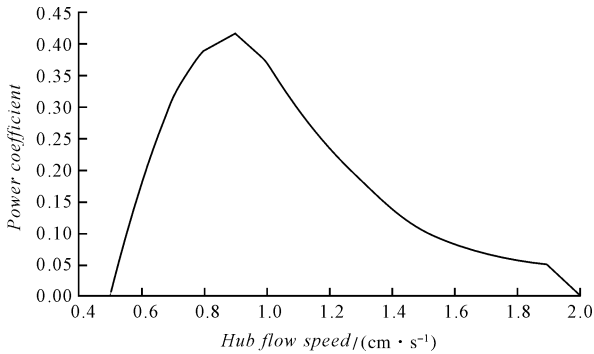


图 3 流速与功率系数曲线图

叶尖速比的变化曲线如图 4 所示。

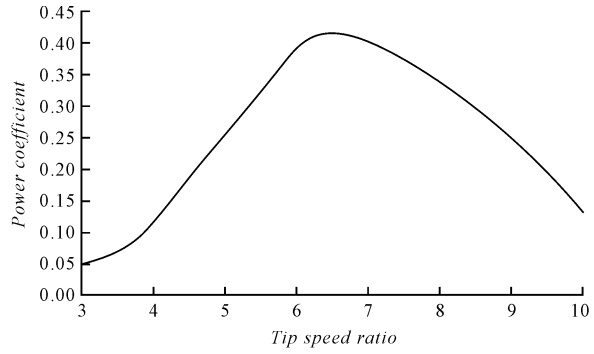


图 4 叶尖速比与功率系数曲线图

额定工况下,叶轮的效率约为 0.37,叶轮的最大捕获效率大于 0.4,在流速约为 0.9 m/s 时取得。叶尖速比在 6~7 范围内时,叶轮的最大能量捕获效率均在 0.4 以上。

设计完成的叶片实物如图 5 所示。



图 5 叶片实物

3 能量管理设计

考虑到风、浪等气候因素的影响及潮汐效应,海流实际流速是不断变化的,所以海流能发电机组的能量输出也是不稳定的,为了使输出电能的电压或电流参数满足海洋测量仪器的使用要求,需要先把发电机输出的不稳定电能转化成稳定的电能。能量管理系统能将发电机组输出不稳定的三相交流电整流后存储在二次电池组中供海洋仪器使用,当海流能机组发电过多或二次电池组蓄满电时,将通过能量管理系统的卸荷电阻将多余电能消耗掉,以此实现系统的离岸自动运行。另一方面,当海流流速太低,发电机输出功率很小、或者无输出功率时,将首先由二次电池组向海洋仪器供电,当二次电池组持续使用至端电压接近保护电压时,能量管理系统可自动切断供电,以保护整个发电系统。

能量管理系统方案结构图如图 6 所示。

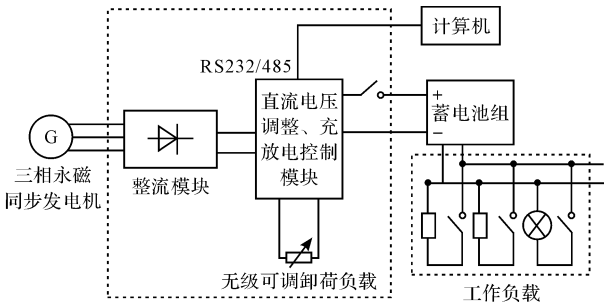


图 6 能量管理系统方案

图 6 中的左边虚线框内为负载控制器,其核心功能为将三相永磁同步发电机发出的电能在使用海洋仪器、二次电池组及卸荷电阻之间进行能量管理和分配。按照标准充放电条件对二次电池组进行充放电控制,确保二次电池组不出现过充及过放现象。同时为了保证在叶轮捕获功率过大时或二次电池组充满后能将多余的能量释放掉,负载控制器中设计有一组卸荷电阻,通过卸荷电阻保护二次电池组和发电机组。

充放电模块能够依据二次电池组的标准充电条件和二次电池组两端的电压变化,采用恒流-恒压两个阶段(恒流段:保持 3 A~4 A 的恒定电流对电池充电,至电池电压达到 244.8 V;恒压段:保持 244.8 V 的恒定电压继续对电池充电,当充电电流降至 400 mA 时停止充电,完成一次充电过程)的方式对二次电池组进行充电控制,通过调节直流变换器的 IGBT 的占空比来调节充电电流和电压,以此实现二次电池组的电压电流双闭环控制^[7]。对于二次电池组的放电控制,本研究采用了限制负载电流和放电电压控

制相结合的方法^[8]。

从硬件设计层面看,能量管理系统分为两个部分:能量传递回路和管理控制器。

硬件设计结构如图 7 所示。

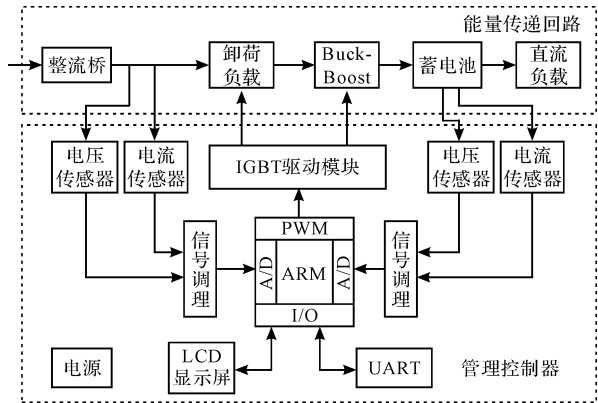


图 7 能量管理系统的硬件结构

能量传递回路由不可控二极管整流桥、可调卸荷电阻、Buck-Boost 结构、二次电池组和直流负载组成;管理控制器由主控制器(ARM 或 DSP)、霍尔效应电流电压传感器、信号调理模块、IGBT 驱动模块、LCD 液晶显示模块和串口通讯模块组成。发电机输出的交流电通过整流模块后变为直流电,再通过电压调节电路或卸荷电阻控制实现二次电池组输入端的按标准条件进行的充放电过程及控制,同时供给直流用电仪器,二次电池组此时可以起到稳定用电设备两端电压的作用。

设计完成后的能量管理控制器如图 8 所示。

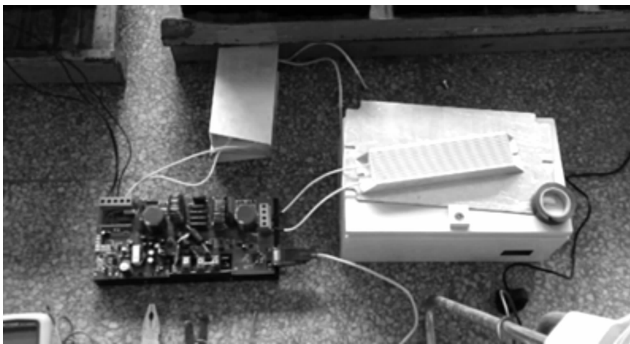


图 8 能量管理系统控制器

其采用微控制芯片和静态开关技术,当机组正常启动后,海流流速逐渐增大到额定流速的过程中,充放电控制器实时监测二次电池组两端电压,将发电机电压、整流电流、二次电池组组的电压、充放电电流值,负载电流等数据实时发送给上位机。在上位机端可对数据进行分析 and 存储。

上位机监控界面如图 9 所示。



图 9 上位机监控实验界面

4 试验结果及分析

为了避免海流能机组下海后出现不必要的故障,造成机组的损害。在下海前,需进行陆地检测试验。

首先是叶片强度试验:本研究取图 7 所示叶片中的一片作为测试叶片,分别针对叶片的挥舞和摆正两个方向进行单点和多点的动/静态载荷测试,经过测试表明叶片强度达到设计要求。

其次对机组密封性能进行测试。按设计要求,机组需满足 40 m 水深能正常工作的条件,但很难在该水深环境下进行试验,且试验成本昂贵,因此本研究采用在陆地上对机组进行气密性试验。为了保证实际密封性能达标,试验中使用的气体压力与水下 40 m 水深处压强相当。40 m 深处机组所承受的压强约为 0.5 MPa,即充气气压的大小应不小于 0.5 MPa,由空压机向机舱内充入压力高于安装地水压的压缩空气^[9],以此检测机组的密封性能。

最后本研究对机组进行拖动试验,一方面对机组的传动部分进行检测,另一方面在陆上完成能量管理系统功能的测试。

本研究在陆上所有测试都完成之后即进行海上试验,如图 10 所示。



图 10 机组海上试验

海上试验表明,当流速达到 0.7 m/s 时,机组便可

以启动;当流速达到额定流速 1 m/s 时,机组输出达到额定功率 500 W 。机组在启动流速下功率输出状况如图 11 所示。

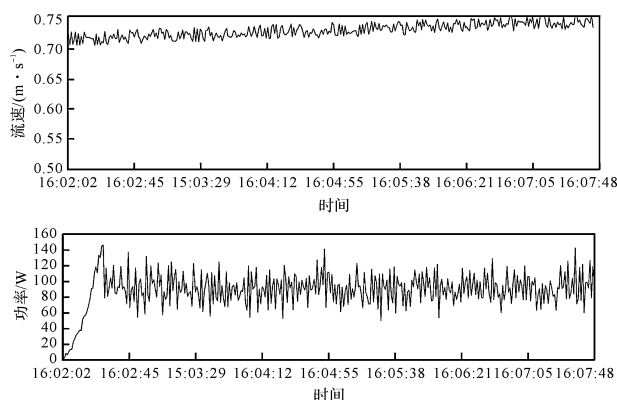


图 11 启动流速下流速与发电机输出功率曲线

机组额定流速下的功率输出状况如图 12 所示。

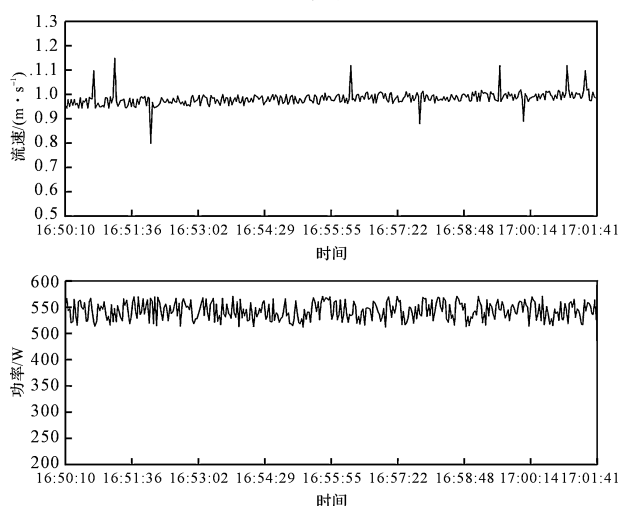


图 12 额定流速下流速与发电机输出功率曲线

5 结束语

本研究提出了一种针对海洋仪器供电这一特殊应用需求的直驱型低流速海流能发电机组及其能量管理系统的设计方法。

海上试验表明:当流速达到 0.7 m/s 时,所研制的

500 W 低流速海流能发电样机能正常启动;当海流流速达到额定流速 1 m/s 时,机组实现满功率发电;能量管理系统运行正常。整个系统连续运行稳定、可靠。发电系统在低流速发电和能量管理这两项关键技术上达到了设计要求,验证了低流速海流能发电机组和能量管理系统的设计。

参考文献 (References):

- [1] MYERS L, BAHAJ A S. Simulated electrical power potential harnessed by marine current turbine arrays in the Alderney Race[J]. **Renewable Energy**, 2005, 30 (11) : 1713-1731.
- [2] DOUGLAS C A, HARRISON G P, CHICK J P. Life cycle assessment of the Seagen marine current turbine[J]. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M Journal of Engineering for the Maritime Environment**, 2008, 222 (1) : 1-12.
- [3] LIU Hong-wei, LIN Yong-gang, MAOSHUN S H. et al. A novel hydraulic-mechanical hybrid transmission in tidal current turbines[J]. **Renewable Energy**, 2015 (81) : 31-42.
- [4] 李 伟,刘宏伟,林勇刚,等. 60 kW 水平轴潮流能发电机组海上试验[R]. 中国海洋可再生能源发展年会暨论坛,威海:国家海洋技术中心,2015.
- [5] 钟贤和,赵 萍,曾明伍,等. 浅析水平轴风力机叶片设计叶尖速比的选择[J]. **东方汽轮机**, 2010 (1) : 31-34.
- [6] MASTERS I, MALKI R, WILLIAMS A J, et al. The influence of flow acceleration on tidal stream turbine wake dynamics: a numerical study using a coupled BEM-CFD model[J]. **Applied Mathematical Modelling**, 2013, 37 (16 - 17) : 7905-7918.
- [7] 杨 宏,王 鹤,王雪冬. 可再生能源发电系统中 VRLA 二次电池组的过充电保护与温度补偿特性的研究[J]. **太阳能学报**, 2001, 22 (2) : 223-225.
- [8] 赵奕凡. 混合动力电动汽车锂离子电池管理系统研究与设计[D]. 武汉:武汉理工大学机电工程学院,2011
- [9] 刘宏伟. 水平轴海流能发电机械关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学机械工程学院,2009.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

祁长璞,林勇刚,赵建兴. 用于海洋仪器供电的低流速海流能发电技术研究[J]. **机电工程**, 2017, 34 (9) : 1055 - 1059.

QI Chang-pu, LIN Yong-gang, ZHAO Jian-xin. Ocean current power generation at low flow velocity for oceanographic instruments[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017, 34 (9) : 1055 - 1059.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>