

波浪能独立稳定发电自动控制系统

吴必军^{1,2}, 游亚戈^{1,2}, 马玉久^{1,2}, 李春林^{1,2}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广东省广州市 510640)
(2. 中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广东省广州市 510640)

摘要: 波力电站采用独立稳定工作方式,在边远海区或海岛上有着广泛的应用前景。自动控制系统是实现波力电站独立稳定工作的关键设备之一。文中介绍了独立稳定波力电站的组成和原理,给出自动控制系统的构成、工作原理、硬件和软件设计。自动控制系统的实际应用效果表明,波力电站把不稳定的波浪能输入转换成稳定的电能输出,并实现了能量采集系统的优化控制和在线充电。

关键词: 波浪能;蓄能稳压器;自动控制系统

中图分类号: TM619; TM76

0 引言

海洋波浪能是以机械能形式存在于海水中的取之不尽的可再生能源。经过近 40 多年的努力,人们近期研建了 2 座商业化波浪能利用装置——波力电站,一座是英国的岸式 LIMPET (land installed marine powered energy transformer) 振荡水柱式波力电站,另一座是漂浮式 Pelamis 波力电站。2 座电站的电能输送方式都采用上网方式,通过大容量的电网来吸收小容量的不稳定电能^[1-2]。然而,波力电站一般建在远离电网的偏远地区或海上,发电上网意味着需要价格昂贵的长距离电缆或海底电缆,显然相对发电能力有限的波力电站来说,长距离输电并不是一种经济的选择。因此,研究波浪能就地取材、就地使用的独立发电技术显得格外重要。波力电站采用独立工作方式需要解决波浪能不稳定的问题,当前人们只是采用储气罐或惯性轮蓄能^[3],使得输出变得稍微平稳一些,谈不上稳定发电,无法独立为用户供电。分析研究表明,波浪能在时间序列上属于平稳随机过程,其平均功率若以秒为单位计则非常不稳定,但若以分钟计就稳定得多,如果以 10 min 计,就比太阳能还要稳定。文献[4]基于上述研究成果,创造性地提出了通过蓄能稳压方式实现独立稳压发电的设想。

基于这一设想的波力电站主要由液压泵、蓄能稳压器、液压马达和发电机等设备组成。液压泵在波浪能驱动下输入不稳定能量;蓄能稳压器把不稳

定的能量输入转换为稳定的液压能;液压能驱动液压马达带动发电机发电或驱动海水制淡装置制取淡水。显然,在这样一个复杂系统中,没有自动控制系统的作用,要实现波浪能到电能的转换是不可想象的,更谈不上稳定和高效发电,因此自动控制系统是波力电站的关键设备之一。

1 独立稳定波力电站的组成及原理

独立稳定波力电站主要由能量采集系统、蓄能稳压器、液压泵、液压马达、发电机和自动控制系统等组成,其构造如图 1 所示。

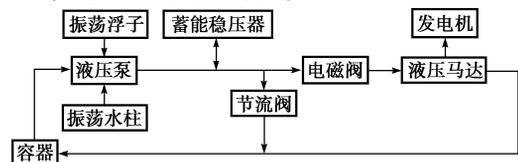


图 1 波力电站构成示意
Fig. 1 Composition of the wave power station

在实施的波力电站中,能量采集系统有 2 个:振荡水柱能量采集系统和振荡浮子能量采集系统。从优化阻尼匹配关系考虑,振荡水柱能量采集系统配备了 2 个恒量旋转泵和 1 个变量旋转泵。变量旋转泵的排量在一定范围内可控制,以电磁阀开关的形式决定泵的工作状态(工作/待机)。振荡浮子能量采集系统配备了 3 台不同规格的往复泵,由换向阀的工作状态决定往复泵的工作状态。蓄能稳压系统起到蓄能和调节的作用。系统配备了 2 台变量马达,其输出能量可在一定范围内变化,以满足不同时期波浪能大小及负载变化的要求。变量马达驱动发电机把液压能转换为电能输出,其工作状态也由电磁阀决定。由于系统自身的特点,还必须保证电力

收稿日期: 2007-07-10; 修回日期: 2007-07-25。
国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目
(2006AA05Z251, 2006AA05Z426)。

输送的安全性、可靠性,因此,还需配备负载自动配置系统。自动控制系统对整个系统实施调节、控制,实现把不稳定的能量输入转换成稳定的能量输出,并保证系统的安全、可靠运行。

独立稳定波力电站的工作流程是:波浪能驱动液压泵工作,液压泵抽取容器内工质并注入蓄能稳压器或直接经过电磁阀流入液压马达,液压马达带动发电机发电;当输入能量的平均值与发电机负载相当时,在蓄能稳压器的调节下,液压马达的输出能量保持基本稳定,系统实现连续稳定发电;当输入能量的平均值小于发电机负载的额定输出能量时,系统实现0-1断续发电;当输入能量大而发电机负载一定时,进入蓄能稳压器的平均能量大于流出蓄能稳压器的能量,当蓄能稳压器中的能量达到某设定值时,节流阀打开,溢流部分能量^[5]。

2 自动控制系统的设计目标、方案

2.1 设计目标

根据独立稳定波力电站能量输入不稳定和蓄能稳压器稳压的特点,自动控制系统的设计目标如下。

2.1.1 液压蓄能装置部分(包括泵、马达、蓄能器、管道等)

1) 根据波浪能的大小及泵的特性,能完成对泵工作状态的 control 及排量大小的 control (手动/自动)。

2) 液压蓄能装置实际上只是一个近恒压装置,装置压力会随输入能量的不同而有些变化,除此之外,负载量也在变化,因此要实现对于液压变量马达排量的 control。

3) 实现液压蓄能装置的保护和能量损失的最小化。当装置储存的能量超过设计容量时,必须快速释放能量,释放能量不能对系统造成破坏性冲击,也不能过多地通过溢流方式损失能量。

4) 实现0-1断续发电方式。当来波能量小于液压马达最低稳定能量输出时,要实现断续能量输出方式,以优化能量输出质量,减少能量损失。

5) 实现对蓄能量和工作压力的监视、对泵转速的监视及对浮子运动幅度的监视。

2.1.2 控制器部分

具有开放性的控制结构,可以使用各种商业上的软硬件资源。采用标准接口,包括软件接口(应用编程接口(API)函数集)和硬件接口(外部设备互联(PCI)总线),实现系统的模块化。

2.1.3 输电部分

液压马达开启时,由于水锤的作用,能量输出有一个尖峰,此尖峰有可能损坏用电设备,所以要采取有效措施克服尖峰对电网的破坏,实现安全有效的

供电和对蓄电池的充电。

2.2 设计方案

根据独立稳定波力电站组成特点及控制要求(把不稳定的波浪能输入转换为稳定的能量输出、优化阻尼匹配等),本文设计的控制系统拟采用负反馈闭环控制方案,其构成如图2~图4所示。

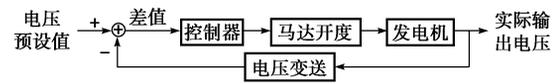


图2 发电机输出电压负反馈闭环控制方案
Fig.2 Scheme of negative feedback control for output voltage of generators



图3 旋转泵负反馈闭环控制方案
Fig.3 Scheme of negative feedback control for rotary pumps



图4 往复泵负反馈闭环优化控制方案
Fig.4 Scheme of negative feedback control for reciprocation pumps

图2中,发电机电压为控制量,变量马达的开度为操作量;图3中,泵的转速为控制量,变量泵的开度和泵的工作状态为操作量;图4中,振荡浮子的运动幅度为控制量,往复泵的工作状态为操作量。整个电站的协调工作由控制器来完成。

控制器采用由PC机和多功能数据采集控制卡组成的主从式结构系统。PC机是核心,由它来协调、控制各子系统的动作,主要功能是:人机界面管理,实现人机对话,完成控制参数预设;测量数据采集和分析处理;根据蓄能稳压器当前能量容量和能量输出状态,及时调整控制量的大小和开关量的状态;与其他设备的通信,如与智能电参数测试仪的通信;数据记录。系统记录的参数有日期、运行时间、蓄能稳压器内工质压力、电动机转速、液压系统工作压力、发电机输出线电压、系统输入能量和输出能量。这些记录量有些可直接记录,有些要通过换算得到。多功能数据采集控制卡接受主机命令工作,负责完成A/D与D/A转换及开关量控制等实时任务。

3 自动控制系统硬件构成和软件环境

独立稳定波力电站自动控制系统的执行机构、传感器等设备与计算机所组成的控制系统见图5。

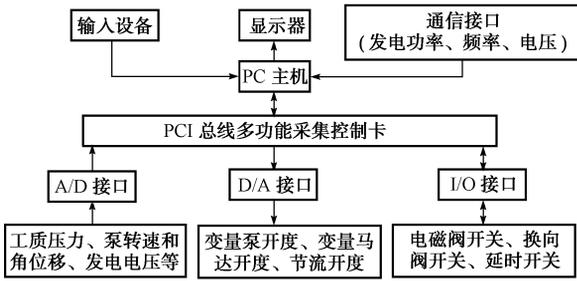


图5 自动控制系统硬件结构

Fig.5 Diagram of hardware for the automatic control system

自动控制系统硬件主要由台式计算机、PCF-7484 多功能采集控制卡、NOC-S 旋转编码器、VT-2000B K40电液比例控制器、EDA9033F 电参数测示仪、压力传感器、流量传感器、开关电磁阀、电磁换向阀、电压变送器等构成。在系统工作过程中,自动控制系统把工质压力、蓄能稳压器压力、发电机电压等参数通过传感器及相应的变送器转换成统一的电平电量,送到采集控制卡的 A/D 输入口,计算机通过时钟时间信号,定时采集这些参数,然后根据给定参数进行运算、存盘。控制器要完成发电机电压参数与预设值的比较,通过比例-积分-微分(PID)控制算法得到变量马达阀门开度的增加量(数字量),送到 D/A 转换器转换成连续的模拟量,通过电液比例控制器输出来控制变量马达,以达到稳定输出的自动控制目的;要完成旋转泵在一定时间内的平均转速与预设参数的比较,以决定旋转变量泵的开启和工作个数;要完成振荡浮子在一定时间内的平均运动幅度与预设值的比较,以决定往复泵的工作台数和型号;在液压蓄能装置压力高于所设定压力时,控制器能控制节流阀按设定的流量工作,以实现

对液压蓄能系统的保护。控制系统软件分为操作系统、上层应用程序、底层接口程序 3 部分。本控制系统采用 Windows 98 或 Windows 2000 作为开发平台,上层应用程序主要是 Visual Basic 应用软件,底层接口程序主要是各种硬件的驱动程序。PCF7484 多功能采集控制卡提供了 Windows 环境下的动态链接库(DLL),可方便地实现主控制机与数据采集控制卡之间的通信和控制。

4 控制方式

用计算机进行调节控制时,都有一个表达对象动态特性的方程式。根据自动控制理论可知,变量马达开度控制可采用单回路定值控制,即依据一个参数组成控制回路,采用 PID 规律进行控制,其控

制表达式为:

$$P = K_c \left[e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{de}{dt} \right] \quad (1)$$

式中: P 为与变量马达开度相关的物理量; e 为电压设定值与测量值的偏差; K_c 为比例系数; T_i 为积分时间常数; T_d 为微分时间常数。

为方便计算机处理,通常将式(1)进行近似,变换为离散的 PID 算式:

$$P_n = K_c \left[e_n + \frac{T}{T_i} \sum_{j=1}^n e_j + \frac{T_d}{T} (e_n - e_{n-1}) \right] \quad (2)$$

式中: T 为采样周期; P_n 为第 n 次采样时计算机的输出量; e_n 为第 n 次采样的偏差值; n 为采样序号。

由于输出值与马达开度一一对应,因此通常称式(2)为 PID 位置算式。为防止计算机出现故障时引起执行机构产生较大幅度的变化,一般采用增量式 PID 控制表达式:

$$P_n = K_c e_n + I e_n + D (e_n - e_{n-1}) \quad (3)$$

式中: P_n 为输出增量; e_n 为本次测量值与上次测量值之差; $I = (K_c T) / T_i$, 为微分系数; $D = (K_c T_d) / T$, 为积分系数; K_c , I 和 D 一般采用齐格勒和尼科尔斯的极限感度法进行选取^[6]。

5 自动控制系统软件设计

系统软件按功能主要分为 6 个部分。

- 1) 初始化: 主要有电磁阀开/关状态设置、变量泵和变量马达开度设置、PID 增益参数选择等。
- 2) 数据采集: 采集量有测量振荡浮子运动幅度的旋转编码器的运动旋转角度、振荡水柱驱动液压泵的旋转速度、蓄能稳压系统的工质压力、发电机的输出电压等。
- 3) 开关控制: 主要有旋转泵和往复泵工作状态控制、马达工作状态控制。
- 4) 数值计算: 主要有平均值计算、差值计算等。
- 5) 电液比例控制器控制量的设定: 主要包括通过设定电液比例控制器控制量来控制变量泵、变量马达、节流阀等的开度。
- 6) 信息显示: 主要包括实时显示旋转泵的转速和工作状态、振荡浮子的运动幅度和往复泵的工作状态、发电机输出电压、功率和工作状态等。

自动控制软件流程如图 6 所示。图中: P_{pot} 为液压蓄能装置工作压力; P_{potmin} 和 P_{potmax} 分别为液压蓄能装置工作时所设置的最低、最高压力; K 为比例系数,其值决定了节流阀的工作状态; P_{pots} 为设置液压马达开启时液压蓄能装置的压力; U 和 U_{set} 分别为电压变送器给出的发电机输出线电压和设定电压; n 和 n_{set} 分别为旋转泵的转速和设定转速; A 和

A_{set} 分别为振荡浮子的运动幅度和设定幅度。数据存盘的信息有日期、时间、采集点数、液压系统工作压力、旋转泵的转速,以及发电机输出电压、频率、功率等。

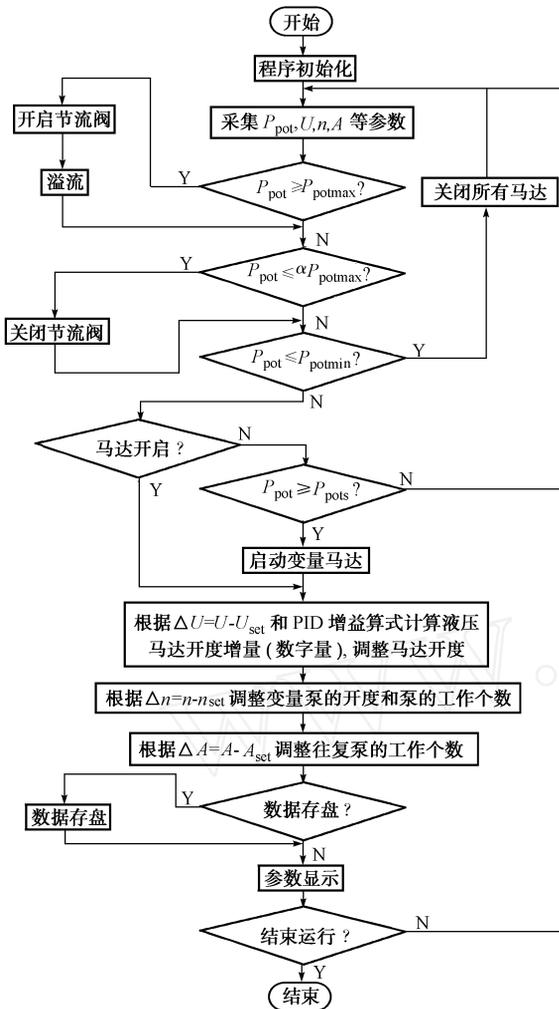


图6 系统软件设计主流程

Fig. 6 Main flow chart of software arithmetic

6 实际海况试验结果

根据前述系统控制方式和原则,于2005年4月完成和调试了波浪能独立稳定自动控制系统,并于4月26日—4月28日进行了实际海况试验。试验过程中由于不可抗拒因素的作用,波浪能独立稳定发电系统遭到破坏,无法进行进一步试验,因而所取得的实际海况试验数据有限。图7为在自动控制系统作用下波力电站实际海况试验发电的一个片断。试验中取 $P_{pots} = 6.5 \text{ MPa}$, $P_{potmax} = 8.0 \text{ MPa}$, $= 0.9375$, $U_{set} = 380 \text{ V}$; PID 参数中取 $K_P = 1.5$, $K_I = 2.0$, $K_D = 0.5$ 。发电机配置了2种负载:星型接法的三相平衡纯电阻负载,每相消耗的额定功

率为 1 kW ; 一台三相 5 kVA 的逆变电源,配有9节 12 V 、 $100 \text{ A} \cdot \text{h}$ 的免维护铅酸蓄电池。

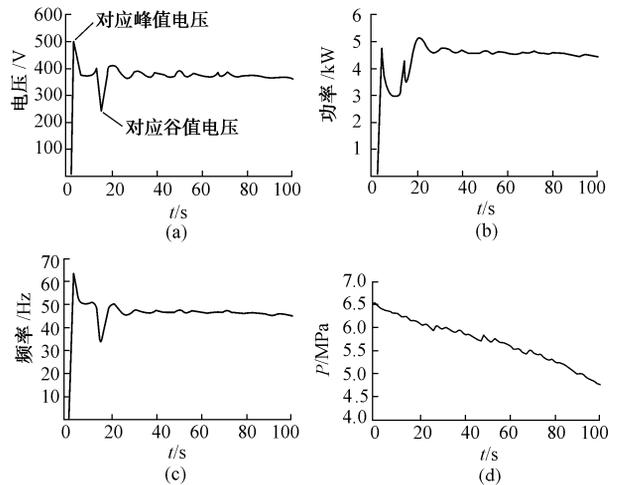


图7 某时段波力电站实际海况发电试验结果

Fig. 7 Test results of the wave power station on real sea waves in one period

图7(a)中曲线代表发电机输出电压随时间的变化情况,可以看到曲线有一个尖锐的峰值电压和一个尖锐的谷值电压,峰值电压与谷值电压之间有一小段运行平稳期,谷值电压后就是平稳运行阶段。通过对事件发生过程进行分析可知,峰值电压是由于液压马达开启时管路中的“水锤”效应引起的,谷值电压是由于发电机通过逆变电源向蓄电池充电造成的。具体原因是,在逆变电源开启瞬间,对蓄电池充电功率较大,而变量马达此时输送给发电机的功率来不及调整,仍维持在一个比较恒定的值,发电机输出电压降低以减少其他负载对能量的消耗,减少的部分能量提供给逆变电源对蓄电池充电,经过一短暂时间后,变量马达输出功率调整增大,发电机输出功率增大,电压恢复到正常范围内。图7(b)中曲线是功率变化曲线,可以看出,在经过一个峰值功率(“水锤”效应引起)后,负载消耗的能量在 3 kW 左右,当逆变电源开启对蓄电池充电后,发电机输出功率增加,在开始充电阶段功率曲线形成一个小尖峰,这是由于瞬态开始充电电流大造成的,然后发电机输出功率就比较平稳了。图7(c)中曲线是发电频率变化曲线,其变化趋势类似于电压曲线。图7(d)中曲线是液压系统工质压力变化曲线,其变化趋势是逐渐下降的,说明输出能量大于波浪输入能量,这种趋势发展下去将最终导致控制系统关闭变量马达,导致波力电站间断发电。如果波浪能输入能使液压系统维持一定的压力变化范围(比如 $5 \text{ MPa} \sim 6.5 \text{ MPa}$),波力电站将持续发电。液压系统工质压力不断变化,而其能量输出要保持基本稳定,因此控

制器要不断调节变量马达的排量,而马达排量控制采用增量式 PID 控制方式。

图 8 为另一时段实际海况发电的试验结果,比较可知,其结果类似于图 7 的结果。

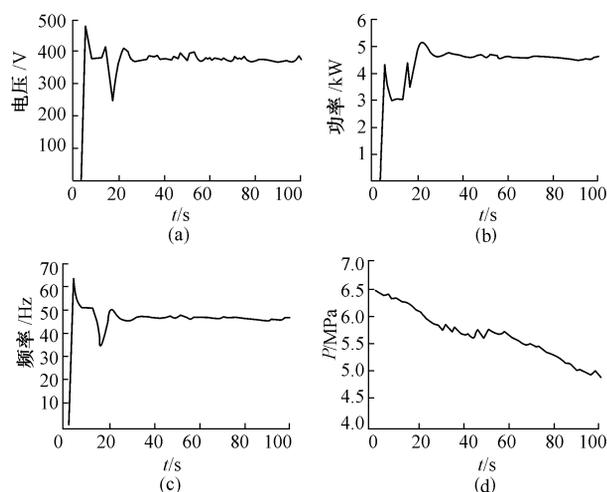


图 8 另一时段波力电站实际海况发电试验结果
Fig. 8 Test results of the wave power station on real sea waves in another period

图 7 和图 8 反映了小波浪实际海况试验中自动控制系统的调控能力。大波浪实际海况试验中,自动控制系统的调控能力由于波浪能独立稳定发电系统遭到破坏而没有得到证实,但其调控能力在实物模型试验中得到了检验^[5]。

7 结语

本文叙述了独立稳定波力发电系统的设想、组成和工作原理,在此基础上提出了自动控制系统的设计方案、控制方式和软件流程,最终研制了整个控制系统。控制系统采用负反馈方式实现了对往复泵和旋转泵优化控制,采用增量式 PID 控制方式实

现了对变量泵排量的控制,通过这一控制方式可以在液压系统工质压力变化的情况下实现液压稳定的能量输出。实际海况试验结果表明,在自动控制系统作用下,波力电站把不稳定的波浪能输入通过液压蓄能系统转换成稳定的电能输出,并实现了对能量采集系统的优化控制和对蓄电池的在线充电,实现了波力电站的独立稳定运行。

参考文献

- [1] CLEMENT A, MCCULLEN P, FALCAO A, et al. Wave energy in Europe: current status and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2002, 6(5): 405-431.
- [2] Ocean Power Delivery Limited. Offshore wave energy [EB/OL]. [2007-03-25]. <http://www.oceanpd.com/default.html>.
- [3] The Queen's University of Belfast. Islay limpet wave power plant [EB/OL]. [2007-04-23]. <http://www.wavegen.co.uk/pdf/LIMPET%20publishable%20report.pdf>.
- [4] YOU Yage, ZHENG Yonghong, SHEN Yongming, et al. Wave energy study in China: advancements and perspectives. *China Ocean Engineering*, 2003, 17(1): 101-109.
- [5] 吴必军,邓赞高,游亚戈.基于波浪能的蓄能稳压独立发电系统仿真研究. *电力系统自动化*, 2007, 31(5): 50-56.
WU Bijun, DENG Zangao, YOU Yage. Simulation of pressure-maintaining storage isolated generating system based on wave energy. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(5): 50-56.
- [6] 藤井隆雄.控制理论.卢伯英,译.北京:科学出版社,2003.
TAKAO Fujii. Control theory. LU Boying, trans. Beijing: Science Press, 2003.

吴必军(1965—),男,博士,副研究员,现从事海洋波浪能方面的研究。E-mail: wubj@ms.giec.ac.cn
游亚戈(1956—),男,硕士,研究员,现从事海洋波浪能方面的研究。E-mail: youyg@ms.giec.ac.cn
马玉久(1970—),男,学士,主要研究方向为液压传动。E-mail: mayj@qibebt.ac.cn

Study on the Automatic Control System of the Wave Power Stand-alone Stable Station

WU Bijun^{1,2}, YOU Yage^{1,2}, MA Yujiu^{1,2}, LI Chunlin^{1,2}

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

(2. Key Laboratory of Renewable Energy and Gas Hydrate, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A wave power station which works on stand-alone stabilization has extensive application prospects at outlying sea area or islands. The automatic control system is one of the key facilities in the station. The composition and principle of the wave power station are introduced. A detailed discussion is made on the structure of the automatic control system, its working principle and process, and hardware and software design. The results of its application show that the wave power station converts the unsteady energy input into the steady electric energy output, realizes optimization control for the energy acquisition systems and charges online.

This work is supported by the High Tech Research and Development Programs of China (No. 2006AA05Z251, 2006AA05Z426).

Key words: wave energy; pressure-maintaining storage system; automatic control system