

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.07.018

基于单自由度强迫振动的直线波浪发电系统研究^{*}

刘贵杰,王新宝

(中国海洋大学 工程学院,山东 青岛 266100)

摘要:针对海洋环境中波浪发电系统存在腐蚀严重、冲击大的问题,对全密封式直线波浪发电系统的物理模型、电能转换、磁力线和磁通分布等方面进行了研究,对系统内电磁阻尼的改变导致发电动子位移幅值变化进行了分析,提出了一种基于单自由度强迫振动的直线波浪发电系统,基于 Ansoft 对直线波浪发电系统的磁场进行了仿真分析,使用单自由度强迫振动模型对发电动子的运动进行了分析,利用波浪水池对发电系统进行了定性实验。研究表明,直线波浪发电系统的全密封方式能解决发电部分腐蚀严重的问题,发电动子位移幅值的可控性减少了系统的冲击,磁力线和磁通分布均匀,系统整体可以跟随波浪一起运动。

关键词:单自由度强迫振动;波浪发电;Ansoft 仿真

中图分类号:TM612

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)07-0782-04

Linear wave power system based on forced vibration of single-degree-of-freedom

LIU Gui-jie, WANG Xin-bao

(College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Aiming at the problem that wave power generation system has serious corrosion and large impact in marine environment, the physical model, electric energy conversion, magnetic field lines and magnetic flux distribution of a fully enclosed linear wave power generation system was studied. The change of electromagnetic damping in the system which leads to the variation of dynamotor displacement amplitude was analyzed. Therefore, a linear wave generation system based on forced vibration of single-degree-of-freedom was proposed. Based on Ansoft, magnetic field of the linear wave power generation system was simulated. The motion of dynamo was analyzed by using Forced Vibration of Single-degree-of-freedom model. Wave pool was used to carry on qualitative experiment of this system. The results indicate that the whole sealed way of linear wave power generation system can solve the serious problem of corrosion for power generation part and the controllability of dynamo displacement amplitude reduces the impact of system. Magnetic field lines and magnetic flux distribution is uniform. The system can follow wave oscillation.

Key words: forced vibration of single-degree-of-freedom; wave power generation; Ansoft simulation

0 引言

波浪能是一种分布广、容量大的清洁可再生能源,与风能和太阳能相比,波浪能发电的可利用时间高达90%^[1]。20世纪70年代,美国、英国、挪威等国家就

已经着手波浪能的研究^[2],并相继完成了永磁圆筒波浪发电装置^[3]、直线式阵列波浪发电^[4]、500 kW 振荡水柱波浪发电、点头鸭波浪发电装置、OPT 波浪换能器^[5]等。在国内,波浪发电技术也得到研究机构的密切关注,包括2005年中国科学院广州能源研究所在广

收稿日期:2016-12-26

基金项目:青岛市民生科技计划项目(14-2-3-63-nsh)

作者简介:刘贵杰(1968-),男,山东青岛人,博士,教授,主要从事海洋机电装备方面的研究。E-mail: liuguojie039@163.com

州汕尾建立的波浪发电站、2013 年中国海洋大学主持研究的 10 kW 级组合型振荡浮子波能发电装置^[6]、国家海洋技术中心研究建立了 100 kW 的摆式波浪发电站等。

根据波浪发电系统的安装位置,可将其分为沿岸安装式、近岸安装式和离岸安装式。每种安装方式都面临海洋环境中存在设备腐蚀、运动与固定结合处需要密封、海浪冲击大等问题^[7]。

笔者研究一种基于单自由度强迫振动的直线波浪发电系统,该系统采用漂浮式的发电方案。在波浪力的作用下,发电系统跟随波浪在垂直方向上运动,系统内部的发电动子因整体运动而发生强迫振动,使得发电动子与绕组定子之间发生相对运动,产生电能。

1 波浪发电装置物理模型

直线波浪发电系统由直线发电动子、定子绕组、密封机架、储能弹簧、控制系统等部分组成。在波浪力的作用下,发电装置在海面做上下起伏运动,系统在波浪中的运动示意图如图 1 所示。

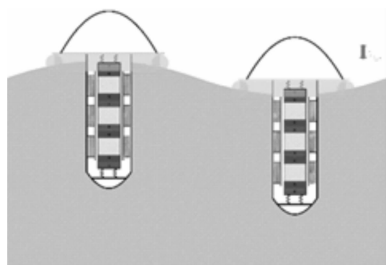


图 1 系统在波浪中的运动示意图

直线波浪发电系统中,动子通过弹簧与密封机架连接,定子绕组与密封机架紧固在一起,动子和定子完全密封在机架舱体内,控制系统密封在顶部的半球舱里。由于发电机的动子、定子、控制系统处于全密封的干燥状态,与波浪没有直接接触,极大地提高了系统的耐冲击性;波浪发电装置外部采用非金属材料制造,有较好的耐腐蚀性能。直线波浪发电系统 1:5 样机如图 2 所示。

1.1 单自由度强迫振动模型

系统在持续性的外激励下作用所产生的振动称为强迫振动^[8]。因外激励对于系统做功,用于补偿消耗在阻尼上的耗散能量,系统将继续振动下去。笔者设计的直线波浪发电系统,可以简化为支撑运动引起的单自由度强迫振动模型,该模型如图 3 所示。



图 2 直线波浪发电系统 1:5 样机

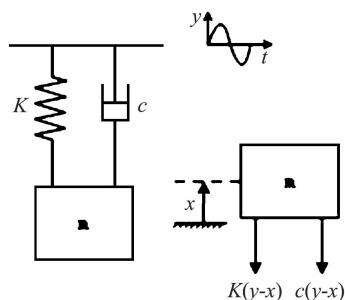


图 3 单自由度强迫振动波浪发电模型

系统中阻尼由机械阻尼和电磁阻尼组成。系统动子克服机械阻尼运动会因摩擦而产生热,进而耗散能量;克服电磁阻尼做功,是线圈切割磁感线产生感应电动势而阻抗其运动的过程,该过程将机械能转换成电能。

设发电机整体的位移为 y , 动子的位移为 x 。取铅垂向上为 x 和 y 轴正方向。在任意时刻 t 对动子作受力分析:动子磁铁的相对位移为 $(x - y)$, 相对速度为 $(\dot{x} - \dot{y})$, 系统静止时:

$$mg = kx_0 \quad (1)$$

式中: m — 动子质量, k — 弹簧的弹性系数。

则:

$$mg - k(x_0 + x - y) - c(\dot{x} - \dot{y}) = m\ddot{y} \quad (2)$$

式中: c — 系统阻尼。

式(2) 整理得:

$$m\ddot{x} + kx + c\dot{x} = c\dot{y} + ky = \omega Y \cos \omega t + kY \sin \omega t \quad (3)$$

式中: ω — 系统的固有频率。

支撑运动的作用相当于给系统作用了两个激励力:弹簧传递给系统的 $kY \sin \omega t$ 和阻尼器的 $\omega Y \cos \omega t$ 。

将同频率的激励力合成为一个简谐激励力:

$$c\omega Y \cos \omega t + kY \sin \omega t = F_0 \sin(\omega t \theta) \quad (4)$$

其中, $F_0 = Y \sqrt{k^2 + (c\omega)^2}$, $\theta = \arctan(c\omega/k)$ 。

微分方程变为:

$$m \ddot{x} + kx + c \dot{x} = F_0 \sin(\omega t + \theta) \quad (5)$$

稳态解: $x = X \sin(\omega t + \theta - \varphi)$ 。

代入方程后得:

$$X = \frac{F_0}{k} \times \frac{1}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\lambda\xi)^2}} = Y \frac{\sqrt{1 + (2\lambda\xi)^2}}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\lambda\xi)^2}} \quad (6)$$

式中: λ —频率比, ξ —阻尼比。

$$\text{令 } \beta = \frac{\sqrt{1 + (2\lambda\xi)^2}}{\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\lambda\xi)^2}}, \text{ 则 } \beta = \frac{X}{Y}。$$

其中: β —动力放大系数, 表征发电系统整体的位移与发电动子位移之间的关系。

根据幅频特性曲线, 当 $\lambda = \sqrt{2}$ 时, 无论 ξ 多大, 波浪发电系统的位移 Y 与发电动子位移 X 相等, 此时不会发出电能; 当 $\lambda > \sqrt{2}$, 发电动子位移大于系统位移, 适合于波浪较小的海域使用; 当, 发电动子位移小于系统整体位移, 适合于波高较大的海域使用, 在波浪大幅运动时, 保证发电动子运动幅值, 避免储能弹簧过拉伸和压缩。

1.2 电能转换分析

直线波浪装置采用动子为永磁铁, 定子为线圈绕组的方案。动子磁铁与定子线圈之间的相对运动速度为 $(\dot{x} - \dot{y})$, 磁场强度为 B , 线圈总长为 L 。

根据法拉第电磁感应定律, 动生电动势:

$$E = BL(\dot{x} - \dot{y}) \quad (7)$$

根据欧姆定律, 发电机电流:

$$I = \frac{E}{R + r} \quad (8)$$

式中: R —外负载; r —发电机内阻。

线圈在做切割磁感线运动时, 导体会受到安培力, 根据安培定律, 安培力大小为:

$$F_{\text{安}} = BIL = \frac{B^2 L^2 (\dot{x} - \dot{y})}{R + r} \quad (9)$$

忽略系统中机械阻尼, 动子受力为:

$$mg - k(x_0 + x - y) - c(\dot{x} - \dot{y}) = m \ddot{x} \quad (10)$$

由式(9)和式(10)可得:

$$c = \frac{B^2 L^2}{R + r} \quad (11)$$

发电机功率:

$$P = EI = \frac{B^2 L^2 (\dot{x} - \dot{y})^2}{R + r} \quad (12)$$

根据上述分析, 可以改变发电机内阻 r 而改变电磁阻尼 c 和阻尼比 ξ 。发电机的固定频率和波浪的频率一定时, λ 为定值; 根据不同海域的波高, 可以通过控制阻尼比 ξ , 改变发电动子的位移幅值, 以适应不同海域。

2 基于 Ansoft 发电机磁场分析

磁力线分布和磁通分布极大影响了发电机的效率, 本研究基于 Ansoft 对直线波浪发电系统的磁场进行分析。

波浪发电系统中发电部分如图 4 所示。

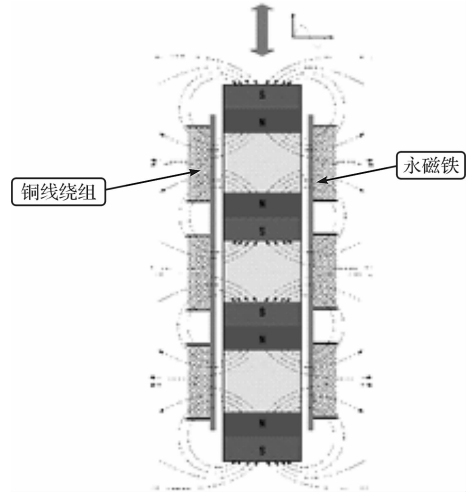


图 4 波浪发电系统的发电部分

波浪发电机是关于 Z 轴的对称模型, 采用 Maxwell 2D 中的 Magnetic/Transient 求解器。在 Ansoft 的计算中, 绘制过大求解域会无谓地增加计算成本。波浪发电机模型计算中, 引用无穷远边界条件即气球边界条件^[9], 磁场既不垂直也不平行于边线, 减少内存和 CPU 的计算资源使用。

仿真结果如图 5 所示。

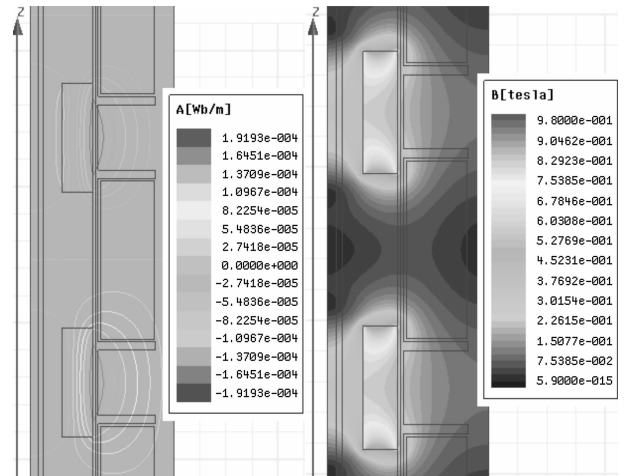
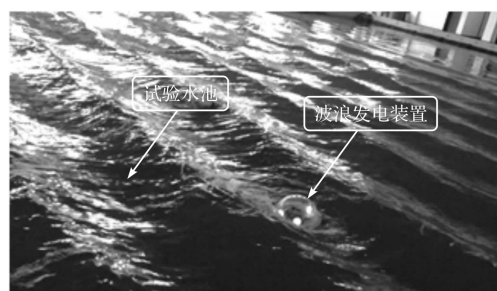


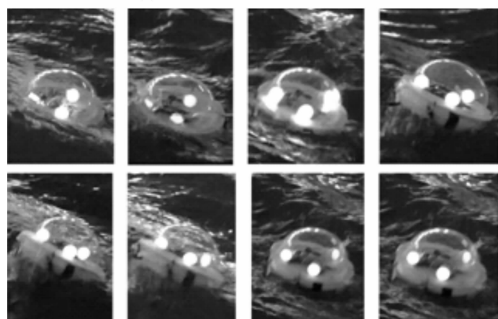
图 5 波浪发电系统磁场仿真结果

3 波浪水池定性实验

波浪发电系统的定性发电实验在山东省海洋工程重点实验室中进行,实验池一侧为造波装置,造波装置可根据实验需求制造出符合试验参数的各类波形。水池区域大小为 $60\text{ m} \times 60\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ (m),池水密度 $1.0 \times 10^3\text{ kg/m}^3$,实验水温 $18\text{ }^\circ\text{C}$,所造波浪的波高 20 cm 、周期 1 s 。波浪发电系统样机按照 1:5 缩尺比制造,仪器舱为半球体,直径 500 mm ,密封机架设计为圆柱体,直径 200 mm ,整机重量约 7.8 kg 左右。波浪发电装置在水池中实验如图 6 所示。



(a) 波浪发电系统与实验水池



(b) 爬越一个波浪的发电状态

图 6 波浪发电定性实验

在波浪发电装置的控制系統里加装 3 只 8 W 的灯泡,用于表明实时的发电状态。以时间为序列,截取波浪发电装置在爬越一个波峰时的发电状态。通过时间序列的发电实验证明,该直线波浪发电系统在波浪中具有较好的随波振动性和发电效果。

4 结束语

本研究提出一种基于单自由度强迫振动的直线波

浪能发电系统,并建立系统的物理模型,研究了电磁分布,在波浪水池中进行了定性实验。

研究表明,该系统能跟随波浪做起伏运动,电磁分布均匀,点亮了 3 只 8 W 的灯泡,将波浪能转换为电能。全密封的设计方式使得系统具有优越的耐腐蚀性;系统内置的弹簧对发电动子有缓冲、储能作用,具有良好的抗冲击性能,故比较适合于恶劣的海洋环境中,如浮标供电、小型观测仪器供电等。根据不同海域,通过调节直线波浪发电系统的和,从而改变发电动子的位移行程,以适应不同波浪环境,可以为不同海域的设备提供源源不断的能源。

参考文献 (References):

- [1] 方红伟,陈雅,胡孝利.波浪发电系统及其控制[J].沈阳大学学报:自然科学版,2015,27(5):376-384.
- [2] 陈中显,余海涛,胡敏强,等.双浮筒直驱式波浪发电系统的优化控制[J].海洋技术学报,2014,33(4):12-16.
- [3] PRUDELL J, STODDARD M, AMON E, et al. A permanent-magnet tubular linear generator for ocean wave energy conversion[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, 46(6):2392-2400.
- [4] LEIJON M, THORBURN K, BERNHOFF H. Wave energy transmission system concepts for linear generator arrays[J]. *Ocean Engineering*, 2004, 31(11):1339-1349.
- [5] 陈中显,胡宜平.一种基于电流控制的海洋波浪发电装置[J].电工电气,2016(4):17-20.
- [6] 朱凯.组合型振荡浮子波能发电装置液压系统研究[D].青岛:中国海洋大学环境科学与工程学院,2015.
- [7] 苏凯凯,刘阶萍,王东兴,等.新型波浪发电装置的研究与开发[J].机电工程,2011,28(12):1491-1494.
- [8] 刘习军,贾启芬,张素侠.振动理论及工程应用[M].北京:机械工业出版社,2016.
- [9] 罗华利,李民生,丁亮.基于 Maxwell 的六相双 Y 移 30° 风力发电机的仿真分析[J].机电工程,2013,30(12):1536-1539.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

刘贵杰,王新宝.基于单自由度强迫振动的直线波浪发电系统研究[J].机电工程,2017,34(7):782-785.

LIU Gui-jie, WANG Xin-bao. Linear wave power system based on forced vibration of single-degree-of-freedom[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(7):782-785.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>