

外次级永磁直线电机在波浪发电系统中的应用

刘春元¹, 洪立玮², 黄 磊³, 祝 贺¹

(1. 嘉兴学院机电工程学院, 嘉兴 310041; 2. 国网冀北电力有限公司廊坊供电公司, 廊坊 065000;

3. 东南大学伺服控制技术教育部工程研究中心, 南京 210096)

摘 要: 对直驱式波浪发电系统的几种永磁直线电机(PMLM)进行比较分析,发现外次级结构的圆筒型PMLM具有较高的功率密度,且便于系统的集成和电能后处理。首先,利用有限元对PMLM的结构进行优化,分析电机的磁力线和磁感应强度分布图,空载和负载感应电动势。然后,根据有限元优化的电机尺寸加工一台样机,并对其电磁性能进行测试,验证电机设计的有效性。最后,设计并加工一套双浮子直驱式波浪发电系统。在连云港海域分别进行静水和动水实验。实验结果表明,所设计的直驱式波浪发电系统能将波浪能转换为电能,可为日后大规模开发和利用波浪能积累经验。

关键词: 直驱式; 波浪发电; 有限元; 圆筒型永磁直线电机; 能量转换

中图分类号: TM315

文献标识码: A

0 引 言

据科学家推测,地球上海洋波浪蕴藏的电能高达90万亿kW,对其进行合理的开发和利用,对解决能源危机具有深远意义。在早期的波浪发电系统中,常采用旋转电机将波浪能转换为电能,此类装置需要液压、齿轮、气缸等中间转换机构,结构复杂且能量转换效率较低。近年来,以永磁直线电机(permanent magnet linear motor, PMLM)为能量转换器构成的直驱式波浪发电系统,具有结构简单、效率高、免维护等优点,受到许多专家学者的青睐。在采取有效保护措施和确保装置可靠的条件下,其建造成本低、输出电能稳定,特别适用于波浪能密度较低的国家,如中国^[1]。比较典型的有瑞典乌普萨拉大学^[2,3]和美国俄勒冈州立大学^[4,5]的直驱式波浪发电系统。

中国对波浪能的开发和利用始于20世纪90年代,中国科学院广东能源所^[6-8]和东南大学^[9,10]等单位已取得可喜的成果。目前,有多种结构的PMLM用于直驱式波浪发电系统,如横向磁通电机^[11,12]和永磁游标电机^[13]等。美国的OPT将圆筒型PMLM^[14]用于波浪发电,并成功研制出500kW

的漂浮式波浪发电系统。瑞典的Uppsala大学采用平板型PMLM^[15],研究阿基米德式波浪发电系统,并进行了大量的实验研究。

本文针对中国波浪能密度低的特点,设计外次级结构的PMLM,提高PMLM的功率密度,且便于电能输出和系统集成。首先,建立PMLM的二维有限元分析模型,分析PMLM的空载磁力线,磁感应强度,以及空载和负载感应电动势等电磁参数。然后,根据优化的结果,加工一台PMLM,对其机械和电磁性能做相关测试。最后,在连云港海域对双浮筒直驱式波浪发电系统分别进行静水和动水试验,实验结果证明此种直驱式的波浪发电装置可有效地将波浪能转换为电能。

1 直驱式波浪发电系统及运动方程

1.1 直驱式波浪发电系统

双浮筒直驱式波浪发电系统如图1所示,主要由内外浮筒、PMLM、数据采集系统、阻尼盘、锚链和沉石等组成。PMLM安装于内浮筒,电机轴通过三脚架与外浮筒相连,外浮筒在海洋波浪力的作用下往复运动,从而带动PMLM工作,将波浪能

收稿日期: 2017-05-25

基金项目: 国家海洋局专项基金(GHME2011GD02); 浙江省自然科学基金(LY19E070004); 嘉兴市科技局项目(2017AY13017)

通信作者: 刘春元(1979—), 男, 博士、讲师, 主要从事新型永磁电机的设计和控制、新能源的开发和利用方面的研究。

liuchunyuany_zjx@163.com

转换为电能。

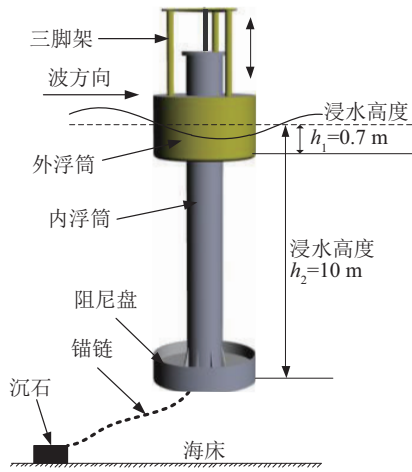


图1 直驱式波浪发电系统示意图

Fig. 1 System of direct-drive wave power take-off

根据海洋波浪水质点的运动特性^[16],由于内外浮筒的吃水深度不同,它们在垂直方向的位移幅值也不同,在内外浮筒之间会产生相对运动,从而将波浪能转换为电能。内浮筒底部阻尼盘的作用是减小内浮筒在海水中的上下运动,提高内浮筒的稳定性,增大内外浮筒之间的相对运动,提高系统的发电效率。基本参数如表1所示。

表1 直驱式波浪发电系统的基本参数

Table 1 Basic parameters of direct-drive power take-off system

参数	数值
外浮筒内半径 $r_{\text{ebuoy}}/\text{m}$	1.0
外浮筒外半径 $r_{\text{ebuoy}}/\text{m}$	2.4
外浮筒高 $h_{\text{ebuoy}}/\text{m}$	1.44
内浮筒半径 $r_{\text{ibuoy}}/\text{m}$	0.86
内浮筒高 $h_{\text{ibuoy}}/\text{m}$	10
阻尼盘半径 r_d/m	2.4
锚链长度 l_{an}/m	13.7
沉石质量 w/t	4

1.2 运动方程

浮筒在海洋波浪力的作用下,主要受机械力、电磁力以及波浪在浮筒上产生的波浪力。根据牛顿第二定律,浮筒运动的动态方程为:

$$(m_1 + m_a) \frac{d^2 x}{dt^2} = F_M + F_G + F_H \quad (1)$$

式中, m_1 ——初级和浮筒的质量, kg; m_a ——附加质量, kg; x ——浮筒的位移, m; F_M ——机械阻力, N; F_G ——电机所产生的电磁力, N; F_H ——流体在浮筒上所产生的波浪力, N。

假设浮筒的运动方向跟波浪的运动方向保持一致,应用运动体的莫里森方程,波浪力可表示为:

$$F_H = \frac{1}{2} C_D \rho D (v_x - \dot{x}) |v_x - \dot{x}| + \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial v_x}{\partial t} + C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} - \ddot{x} \right) \quad (2)$$

式中, C_D ——拖拽力系数; ρ ——流体的密度, kg/m³; D ——浮筒的直径, m; C_m ——附加质量系数; v_x ——水平运动的速度, m/s。

对双浮子波浪发电系统,机械阻力主要包括电机轴与初级的接触摩擦力和电机处于空载运动过程中的电磁力:

$$F_M = F_C + F_{EM} \quad (3)$$

式中, F_C ——接触摩擦力, N; F_{EM} ——电机空载时的电磁力, N。

若假设电机轴与初级的接触摩擦力是库仑摩擦力,则它们之间的关系式可表示为:

$$F_C = \mu F_N \quad (4)$$

式中, μ ——摩擦系数; F_N ——法向力, N。

电机的电磁力是指在空载情况下,初级和次级之间的相互产生的力。它由电机中的磁滞和涡流损耗引起,可用式(5)描述:

$$F_{EM} = F_h + F_E \quad (5)$$

式中, F_h 、 F_E ——为磁滞损耗和涡流损耗所引起的力, N。

$$F_h = k_h \frac{1}{p} (B_{\max})^n \quad (6)$$

式中, k_h ——永磁体材料的系数,取常数; B_{\max} ——最大磁感应强度, T; p ——电机的极距; n ——实验确定,范围为 1.5~2.5。

F_E 不仅与最大磁感应强度、极距和材料的属性有关,而且与电机的运动速度、电机的初级叠片的厚度有关:

$$F_E = k_e \frac{v}{p} (B_{\max} t)^2 \quad (7)$$

式中, k_e ——经验常数; v ——电机的运动速度, m/s; t ——电机叠片的厚度, mm。

电机可用粘性阻尼器来近似描述,电磁力可表示为:

$$F_G = -\gamma v \quad (8)$$

式中, γ ——阻尼系数。

2 PMLM的结构

发电机的功率密度是衡量直驱式波浪发电系统的效率以及系统性价比的重要参数之一。研究发现永磁体的充磁方式以及次级的位置跟功率密度存在密切关系^[9]。在相同体积以及速度下,采用外次级结构形式的 PMLM,其输出功率高于内次级 PMLM,因此考虑外次级结构形式的 PMLM。此外,还考虑以下 3 点:

1)外次级结构形式有助于连接浮子。将 PMLM 的次级和浮子刚性连接,使得整个结构趋于紧凑,能最大程度地将波浪能转换为电能,提高整个系统的转换效率。

2)当 PMLM 的初级固定(即绕组部分)有利于电能的传输,外围装置(包括电源、充电器、蓄电池等)利于固定。

3)外次级结构形式,由于绕组所需的体积较小,可减小发电机的内阻、热损耗降低、提高发电机的转换效率。

另外,行程也是 PMLM 设计中一个需要考虑的重要因素,对于波浪发电机来说,行程的设计至关重要,关系到发电机的运行效率和成本。行程过大,会增大系统的成本;行程过小,不仅系统效率低下,且给系统的稳定性以及坚固程度带来影响。在设计过程中,必须考虑实际的运行环境的波高。在本文中,由于实验所处海域的波高为 0.5~1.5 m,考虑余量,所设计电机的行程为 1.69 m。

图 2 所示为所设计的圆筒型 PMLM 的二维结构图。其边端和气隙采用圆弧过渡方式,用以减小定位力。绕组采用模块化饼式绕组,单独加工成饼,然后嵌入电机初级槽中。在凸初级的凹陷处,填充由弹性大、强度高的硅橡胶板材料的防撞击垫圈。永磁体的充磁方式为 quasi-Halbach 结构,用于增大气隙磁密,增大功率密度。

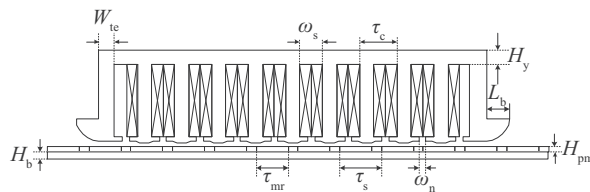


图 2 PMLM 的二维结构

Fig. 2 Two-dimensional structure of permanent magnet linear generator

利用有限元分析对电机进行优化设计,其主要的参数如表 2 所示。

表 2 PMLM 的参数

Table 2 Parameters of permanent magnet linear generator

参数名称	数值
极距 τ /mm	33.8
径向永磁体长度 τ_{mr} /mm	25.8
轴向永磁体长度 τ_{ms} /mm	8
槽距 τ /mm	30
槽宽 ω /mm	18.6
外径 R /mm	245
内径 R /mm	150
永磁体厚度 H_{pm} /mm	4
气隙 g /mm	3

2.1 磁力线分布

图 3a 所示为发电机在空载状态下的磁力线分布图,图 3b 为磁力线在某处的局部放大图。从图 3b 中可看出,磁力线主要为 3 种类型,磁力线 1 由永磁体 PM1,经过气隙—初级—气隙—PM3—背铁,然后经 PM1 构成回路;磁力线 2 跟 1 略有区别,即由 PM1—气隙—初级—气隙—PM3—背铁—PM2—背铁—PM1 构成回路;磁力线 3 直接由 PM1—气隙—PM3—PM2—PM1 构成回路,其中包括很小的一部分漏磁。轴向充磁的永磁体分担一部分磁力线的流量。磁通和磁密是成比例关系的,因此相比于仅仅的轴向和径向充磁形式,这种 quasi-Halbach 结构形式可减小背铁厚度,从而减小次级的重量,节省成本,且提高电机的性能。当轴向充磁结构的永磁体跟初级铁芯相对应时,磁力线的分布和上述基本一致,只是漏磁较大,因此在设计永磁体长度时,一般径向充磁的永磁体长度大于轴向充磁的永磁体长度。

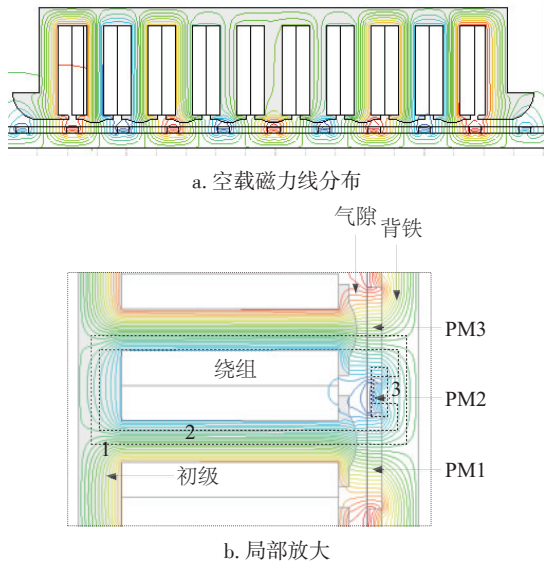


图3 空载磁力线的分布和局部放大图
Fig. 3 No-load magnetic field distribution and partial enlargement

2.2 磁感应强度

空载时的磁感应强度 B 的云图如图4所示。初级铁芯背部的磁感应强度最大值为 1.41 T。齿中间的磁感应强度数值最大值为 1.59 T, 两者都在设计范围之内。永磁体中间的磁感应强度数值最大值为 0.95 T。

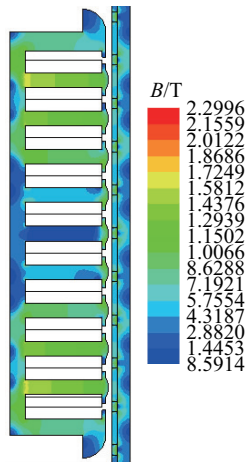


图4 空载时的磁感应强度云图
Fig. 4 No-load magnetic flux density

2.3 感应电动势

感应电动势是衡量电机性能的主要参数之一。由于波浪的周期和频率始终处于随机运动, 即在波浪发电系统中, 电机的运动部分也跟随波浪做

无规律的运动。在分析电机性能中, 假设发电机的速度为 0.4 m/s。图 5a 给出当电机运行在速度为 0.4 m/s 时的空载感应电动势波形。图 5b 和图 5c 分别为速度为 0.4 m/s, 负载为 $40\ \Omega$ 时的负载电动势和电流波形。由于所加负载为纯阻性负载, 因此在相位和形状上跟负载感应电动势类似, 仅仅在大小上刚好为电阻值的系数关系。

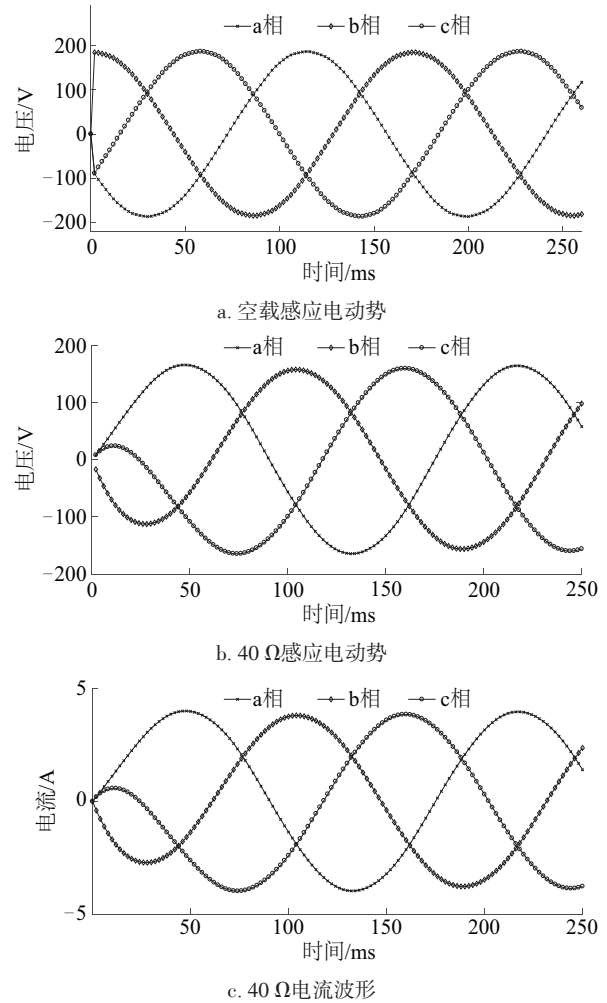


图5 感应电动势和电流波形
Fig. 5 Waveform of EMF and current

3 实验研究

3.1 电机加工

电机次级背铁的长度为 2.1 m, 为方便永磁体粘贴用 5 段分别加工, 待永磁体粘贴完毕后再将它们之间无缝连接。由于电机体积较大, 永磁体采用 quasi-Halbach 充磁方式, 存在较大的排斥力, 因此用燕尾槽将其固定。加工成型的样机如图 6 所示。



图6 加工成型的样机

Fig. 6 Prototype

3.2 电机测试

图 7 为测试的空载感应电动势波形图。其趋势和有限元分析得到的波形基本吻合,在数值上有所减小,原因有以下 4 点:

- 1) 利用有限元分析是在其他条件(摩擦力、涡流损耗等)均忽略的情况下得到的数值;
- 2) 在加工过程中,由于误差所引起的,特别是轴的长度较长,从而使得各部分的光洁度不同,引起摩擦力的变化;
- 3) 电机安装过程中的误差。次级的背铁由 4 块长度相同的圆筒拼接而成,在接口处存在衔接误差;
- 4) 由于电机的体积较大,在带动电机运行的过程中,速度不均匀造成的误差。

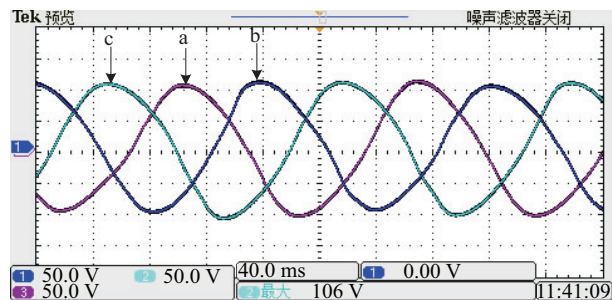


图7 空载感应电动势

Fig. 7 No-load EMF

3.3 海试实验

根据上文分析的波浪理论以及直线电机的设计理论,实验室设计并加工一套直驱式波浪发电装置,如图 8 所示。内外浮筒采用超高分子量聚乙烯材料,其材料特性化学稳定性极高,在海水中数十年不会分解,不会污染环境;浮体及尾管具有自润滑性,任何水生物不会粘连浮体及尾管,节省了铲除水生物的人力物力;具有很高的弹性和硬度,被外力撞击后,迅速吸收撞击能量,恢复原形。相比

于不锈钢材料,该种材料重量轻、惯性小,被撞击后可迅速移位,化解了撞击力,避免了破坏。其余材料均选用耐海水腐蚀的 316L 不锈钢材料。



图8 波浪发电系统实物图

Fig. 8 Photo of wave power take-off system

实验地点为连云港港口,其位于江苏省东北段,北纬 $34^{\circ}44'$,东经 $119^{\circ}27'$,其中 28 号泊位水深 16.5 m。由于港口的地理位置,波浪较小,适合该装置的静水实验要求。静水实验的主要实验目的是各重力之间的平衡以及配重,其一是电机的初级位于次级中间,确保行程不受影响;其二为整个装置的重心位于下端,保证装置位于海洋中漂浮。实验过程如图 9 所示。



图9 静水实验图

Fig. 9 Photo of hydrostatic test

在完成静水实验后,将装置运至秦山岛周边的海洋中,位置位于北纬 $34^{\circ}54'9''$,东经 $119^{\circ}27'31''$ 。在投放实验装置中,先将沉石调至船舷(沉石总重为 4 t),用绳索固定在船边,然后投放波浪发电装置,等发电装置稳定工作在海面,最后解开固定沉石的绳索。具体的投放如图 10a 所示,稳定运行时如图 10b 所示。

在波浪垂直波浪力的作用下,漂浮直驱式波浪发电系统的内外浮筒之间产生相对运动,从而驱动 PMLM 进行发电运行。而内浮筒接近静止状态,因此,双浮筒漂浮式波浪发电系统具有较好的静态特

性和动态特性。



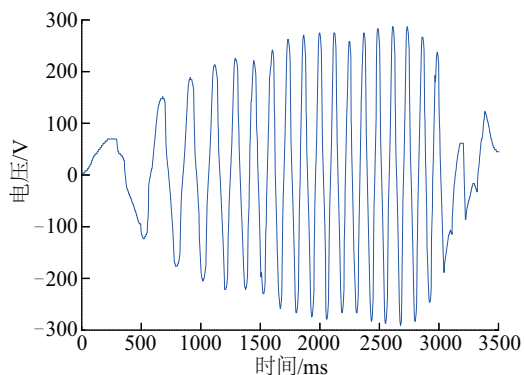
a. 系统投放

b. 稳定运行

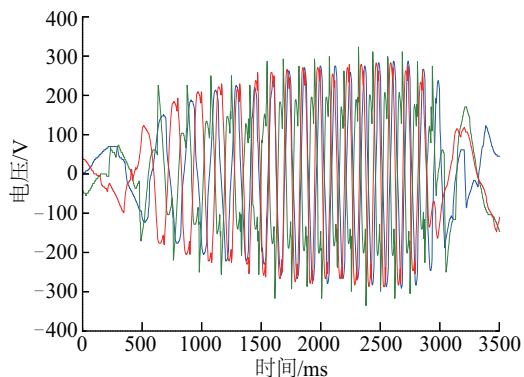
图 10 波浪发电装置系统投放和运行图

Fig. 10 Installation and stable operation pictures of direct-drive wave power system

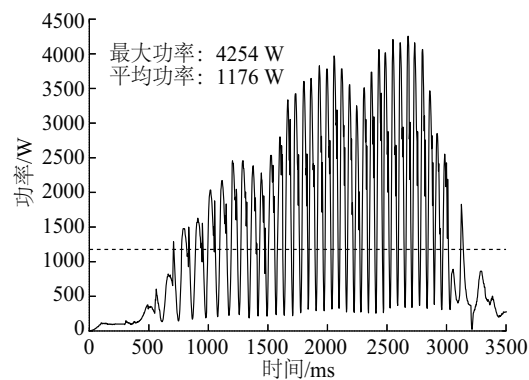
图 11 为直驱式海浪发电装置在某时间段内发电机的输出单相和三相电压波形以及瞬时功率曲线图。其中,图 11a 为单相电压,可看出,在这段时间内,发电机输出电压的最大峰值为 300 V,其频率随波浪运动的速度而变化。图 11b 为三相电压波形,其值比较凌乱,主要原因是此段时间内,海洋波浪运动的不平滑性,造成直驱式波浪发电系统的输出电压局部发生畸变,再加此段时间内



a. 单相电压



b. 三相电压



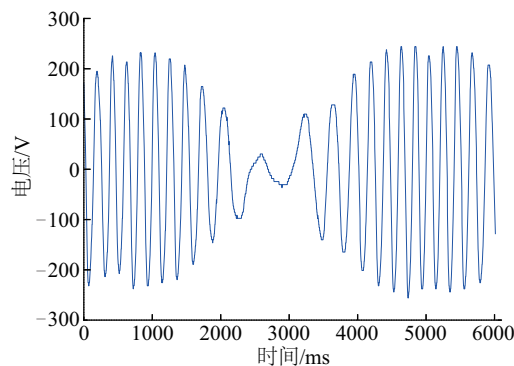
c. 瞬时功率和平均功率

图 11 输出电压和功率

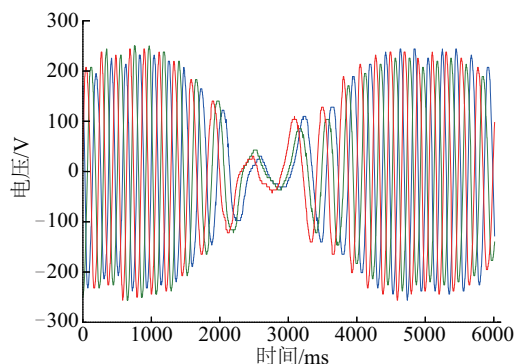
Fig. 11 Output voltage and power

海洋波浪的波高较大,超过所设计的行程 1.69 m,会引起机械之间的碰撞,也会导致发电机输出电压波形发生畸变。图 11c 为此段时间内发电机的瞬时功率和平均功率,其值分别为 4254 和 1176 W。

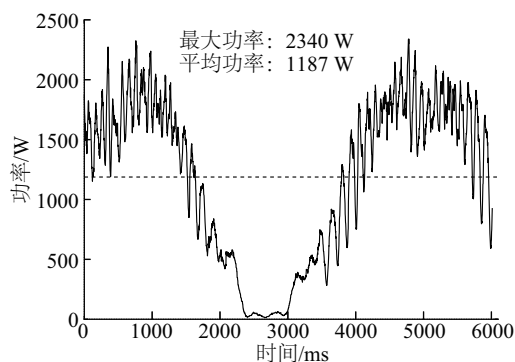
图 12 为直驱式波浪发电装置在另一时段内的单相电压、三相电压、瞬时功率和平均功率的曲线图。此时间段内,波浪运动近似为一个周期。输出电压的峰值为 230 V,且电压曲线较为平滑,出现电压曲线较为平滑的主要原因是此时间段内的海洋波浪波高未发生突变,从而电压变化趋势也较平滑的。在这一时段,其最大输出功率和平均功率分别为 2340 和 1187 W。直驱式波浪发电系统的输出电压和波浪的运动速度有较大关系。如果波浪运动的速度接近匀速,则 PMLM 的输出电压波形接近正弦或余弦。然而,波浪的运动速度却是随机的,因此其输出电压波形比较凌乱,必须通过电源后处理后才能并入电网或供用电设备使用。



a. 单相电压



b. 三相电压



c. 瞬时功率和平均功率

图12 输出电压和功率

Fig. 12 Output voltage and power

4 结论

就直驱式波浪发电系统进行深入研究,优化设计 PMLM,并加工一套直驱式波浪发电装置,在连云港海域进行静水和动水试验,得出以下主要结论:

1) 针对圆筒形永磁直线发电机的结构,结合波浪发电的实际情况,就系统集成、电源输电线的输出、能量密度等多方面综合考虑,得出外次级的结构,适合用于直驱式波浪发电系统。

2) 利用有限元,对 PMLM 进行优化设计,根据优化的数据,加工样机,并对样机进行电磁方面的测试,测试结果与有限元分析的结论一致。

3) 在静水和动水中对直驱式波浪发电系统进行测试。静水实验中,调节平衡位置;动水试验中,采集 2 个时间段的数据,其平均功率分别达到 1176 和 1187 W,最大功率分别达到 4254 和 2340 W,证明所设计的系统可将波浪能有效地转换为电能。

[参考文献]

- [1] M E 麦考密克,许适,(译).海洋波浪能转换[M].北京:海洋出版社,1985:155—163.
- [1] Mac Cormick M E. Ocean wave energy conversion [M]. Beijing: China Ocean Press, 1985: 155—163.
- [2] Leijon M, Danielsson O, Eriksson M, et al. An electrical approach to wave energy conversion [J]. Renewable Energy, 2006, 31(9): 1309—1319.
- [3] Waters R, Rahm M, Eriksson M, et al. Ocean wave energy absorption in response to wave period and amplitude-offshore experiments on a wave energy converter [J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(6): 465—469.
- [4] 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.
- [5] Elwood D, Yim S C, Amon E, et al. Experimental force characterization and numerical modeling of a taut-moored dual-body wave energy conversion system [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2010, 132(1): 011102—011107.
- [6] 吴必军,刁向红,王坤林,等. 10 kW 漂浮点吸收直线发电波力装置 [J]. 海洋技术, 2012, 31(3): 68—73.
- [6] Wu Bijun, Diao Xianghong, Wang Kunlin, et al. 10 kW floating point absorber direct drive wave energy device [J]. Ocean Technology, 2012, 31(3): 68—73.
- [7] 林礼群,姜家强,吴必军,等. 漂浮式波浪能直线发电原理试验研究 [J]. 太阳能学报, 2016, 37(3): 564—569.
- [7] Lin Liqun, Jiang Jiaqiang, Wu Bijun, et al. Experimental study on linear power generating of floating wave energy conversion [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2016, 37(3): 564—569.
- [8] 王立国,游亚戈,盛松伟,等. 鸭式波浪能发电装置中蓄能工质的选择研究 [J]. 太阳能学报, 2014, 35(12): 2525—2529.
- [8] Wang Ligu, You Yage, Sheng Songwei, et al. Research on storage medium in duck device for floating wave energy power generation [J]. Acta Energeticae Solaris Sinica, 2014, 35(12): 2525—2529.
- [9] 刘春元,余海涛,胡敏强,等. 永磁直线发电机在直驱式波浪发电系统的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 90—98.
- [9] Liu Chunyuan, Yu Haitao, Hu Minqiang, et al.

- Application of permanent magnet tubular linear generators using direct-drive wave power generation take-off systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(21): 90—98.
- [10] Liu Chunyuan, Yu Haitao, Hu Minqiang, et al. Research on a permanent magnet tubular linear generator for direct drive wave energy conversion[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2014, 8(3): 281—288.
- [11] Polinder H, Mecrow B C, Jack A G, et al. Conventional and TFPM linear generators for direct-drive wave energy conversion[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, 20(2): 260—267.
- [12] Mueller M A. Electrical generators for direct drive wave energy converters[J]. *IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution*, 2002, 149(4): 446—456.
- [13] Brooking P, Mueller M A. Power conditioning of the output from a linear vernier hybrid permanent magnet generator for use in direct drive wave energy converters[J]. *IEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution*, 2005, 152(5): 673—681.
- [14] Elwood D, Yim S C, Prudell J, et al. Design, construction, and ocean testing of a taut-moored dual-body wave energy converter with a linear generator power take-off[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(2): 348—354.
- [15] Waters R, Rahm M, Eriksson M, et al. Ocean wave energy absorption in response to wave period and amplitude-offshore experiments on a wave energy converter[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2011, 5(6): 465—469.
- [16] 陈 文, 滕 斌. 摆式波能转换装置水动力特性频域分析[J]. *海洋工程*, 2014, (6): 59—67.
- [16] Chen Wen, Teng Bin. Frequency-domain analysis for hydrodynamic characteristic of pendulum wave energy converters[J]. *The Ocean Engineering*, 2014, (6): 59—67.

APPLICATION OF OUTER-PMLG FOR DIRECT-DRIVE WAVE POWER SYSTEM

Liu Chunyuan¹, Hong Liwei², Huang Lei³, Zhu He¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaxing University, Jiaxing 310041, China;

2. State Grid Langfang Power Supply Company, Langfang 065000, China;

3. Engineering Research Center for Motion Control of MOE, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Several kinds of permanent magnet linear motor are compared and analyzed which are commonly used in direct-drive wave power take-off system. According to the characteristics of wave power system, the structure of outside secondary was chosen, because the energy density of permanent magnet and efficiency of wave energy conversion are improved, and also fit for integrity and power post-processing. Firstly, the structure of permanent magnet motor is optimized using finite element method. The magnetic force, magnetic flux distribution, and no-load and load induction electromotive force of the motor are analyzed. Then, a prototype generator is manufactured according to the optimum parameters. Finally, the electromagnetic properties of motor are test, and the effectiveness of the motor design verified by an experiment. A set of double buoys direct-drive wave power system which is used in marine environment is manufactured. The experiment of still and dynamic water is tested in the area of Lianyungang. The results show that wave energy is converted in electrical energy efficiently, and gather experience for the large-scale development and utilization of wave energy for later used.

Keywords: direct-drive; wave power; finite element; tubular linear permanent-magnet generator; energy conversion