

浮式发电平台用直线振荡电机的设计与研究

张 静¹, 常 臻², 范舒羽¹

(1. 金陵科技学院机电工程学院, 江苏 南京 211169; 2. 盐城工学院机电工程学院, 江苏 盐城 224051)

摘 要: 设计了一种海上浮式发电平台用单相永磁直线振荡电机, 该电机在电动状态时实现平台减振功能, 在发电状态时实现平台多能源互补发电。首先, 根据波浪载荷、电磁负荷参数建立永磁直线振荡电机模型结构和系统振荡时域微分方程, 完成电机参数匹配设计。其次, 采用有限元法分析电机在空载时的气隙磁场分布情况; 计算电机在电动状态时的振荡位移和振荡频域, 分析电磁推力随输入电流的变化特性; 研究电机在发电状态时的电动势和输出电能质量情况。最后, 通过改变电机定子永磁体环结构, 优化电机发电性能。分析结果表明, 该电机体积小, 功率密度大, 适用于漂浮式发电平台减振系统, 其设计与优化分析方法适用于同类振荡电机的设计与分析领域。

关键词: 直线振荡电机; 永磁体; 电磁场; 有限元法; 平台减振系统

中图分类号: TM351; TM359.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-755X(2022)02-0053-06

Design and Research on a Linear Oscillation Machine for Floating Power Generation Platform

ZHANG Jing¹, CHANG Zhen², FAN Shu-yu¹

(1. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China; 2. Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

Abstract: This paper presents a single-phase permanent magnet (PM) linear oscillation machine for power generation floating platform off land. It achieves the function of vibration attenuation when the machine runs as a motor, and it achieves the function of multi-energy complementary power generation when the machine runs as a generator. Firstly, based on wave loading and electromagnetic loading, the structure and parameters of the machine are obtained, and the time domain differential equations of system oscillation are established. Secondly, the air-gap magnetic field distribution of the machine in the condition of no-load is analyzed by finite-element method. The oscillation displacement and oscillation frequency of the machine are calculated as a motor, and electromagnetic thrust with different incoming current is analyzed. Electromotive force (EMF) and the output power quality are illustrated when the machine runs as a generator. At last, the structures of PM ring are optimized to improve the performance of the generator. All the results show the machine has the advantages of small volume and high flux density. It is suitable for floating power generation platform damping system, and the method of design and optimization is suitable for the field of similar oscillating motors.

Key words: linear oscillating machine; PM; electromagnetic field; finite-element method; platform damping system

随着海上风能、波浪能等新型能源的不断开发和利用, 多种漂浮式能源互补发电平台应用于深海区

收稿日期: 2022-05-07

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目 (BK20150115)

作者简介: 张静 (1980—), 女, 辽宁锦州人, 副教授, 博士, 主要从事新能源发电系统与储能技术研究。

域。这种能源组合发电系统可以有效提高系统平台输出功率的稳定性,提升海洋能源的空间利用率,减少海洋发电系统平台架构建设成本^[1-3]。相较于固定式风机平台,浮式风力机平台要承受风力机的空气动力载荷、海洋波浪和海流的水动力载荷、平台的系锚载荷,在上述环境载荷耦合作用下研究平台的动力学特性是较为复杂的问题。在实际工程应用中,通过设计平台减振装置实现平台的减振功能,将波浪有害的振动能量进行转换,既可以与发电平台能源互补又可以减小结构的振动,提升平台机构的平稳性与安全性^[4-5]。

早在 20 世纪 90 年代,国外相继出现对筒形直线振荡电机的研究,应用领域主要为冰箱压缩机、斯特林制冷系统和斯特林引擎发电系统。如文献[6]提出了一种无轭部结构的直线振荡电机,其电磁推力最大可达 250 N。文献[7]设计了一种复式直线振荡电机,对其齿部和轭部的硅钢片叠制工艺进行研究。在国内,对直线振荡电机的研究主要集中在高校和科研院所,比如浙江大学、华中科技大学、东南大学和沈阳工业大学等对横向磁通双定子永磁直线振荡电机、圆筒形直线振荡电机、单极动磁式直线振荡电机等的模型和电磁性能进行研究^[8-12]。

直线振荡电机根据通入电源类型可分为交流振荡电机和直流振荡电机,或分为单相振荡电机和三相振荡电机。根据电机内运动机构的不同分为电枢运动型、磁场运动型等。其中,相比三相振荡电机,单相振荡电机的机电结构简单,运动行程短,响应迅速,控制方法简单可靠;相比电枢运动型振荡电机,单相运动型振荡电机的磁场体积小,电机密封与加工工艺更为简单。

基于上述分析,本文提出了一种用于浮式发电平台调谐减振系统的筒形单相永磁直线振荡电机。电机工作在发电状态时,研究其输出电能特性,实现波浪能与风能组合互补发电;电机工作在电动状态时,研究其振动特性,实现对发电平台的调谐减振功能,提高系统结构的稳定性和电能输出效率。首先,根据波浪载荷、电机的电磁负荷建立电磁耦合模型,分析电机内电磁场的分布情况,计算电机绕组自感、互感参数,以及绕组端输出电动势变化情况和电机内齿槽定力。其次,根据机械振荡原理搭建减振与发电系统振荡时域模型,分析电机振荡频率响应、定子振荡位移及电机电磁推力。最后,通过优化电机定子永磁体结构,提高输出电功率和转换效率。

1 直线振荡电机时域分析模型与结构机理

1.1 时域分析振荡模型

在浮式平台减振系统中,振荡电机所带的负荷为波浪载荷,即波浪力通过中间传动机构(如浮筒或推板)传导到电机的定子结构部分,此过程的运动物理模型可用带有阻尼的振荡模型来分析,如图 1 所示。

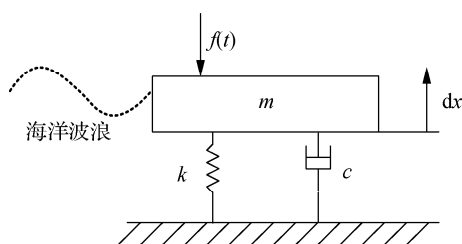


图 1 电机时域分析振荡模型

假定系统振荡过程中机械摩擦力为零,且振荡条件充足,根据牛顿第二定律可得系统的时域振荡方程如式(1)所示。

$$ma = f(t) - kx - cv \quad (1)$$

其中, m 为系统质量, a 为振荡运动加速度, k 为弹性系数, x 为系统振荡位移, c 为系统运动阻尼系数, v 为系统振荡速度。 $f(t)$ 为系统中随时间变化的振荡物理量,当研究振荡电机的电动状态时, $f(t) = 0$,即此时为自由振荡系统;当研究振荡电机的发电状态时, $f(t)$ 为波浪力的垂直分量,计算如式(2)所示。

$$f(t) = F \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

其中, F 为波浪振荡幅值, ω 为波浪力函数角频率, φ 为初相位。

将式(1)转换为微分方程,如式(3)所示。

$$f(t) = m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx \quad (3)$$

1.2 结构及运行机理

经过对电机外形特点的分析,结合浮式平台的波浪环境以降低模型的计算复杂性,本文提出一种圆筒形单相永磁直线振荡电机,具体三维结构如图 2 所示。电机采用磁场运动型结构,即定子内采用半开口槽结构,槽内放置饼式绕组线圈,动子铁心外侧采用表贴式永磁体环结构。

电机定子槽内的 4 个饼式绕组正反相接形成单相绕组,其振荡电路的振荡频率和机械振荡频率相同,其电动状态的控制方法更简捷。根据虚功法计算电机动子上产生的电磁推力,如式(4)所示。

$$F = - \frac{\partial W(i)}{\partial x} \quad (4)$$

其中, $W(i)$ 为电机内磁场能。永磁体(PM)表贴式单相振荡电机的电磁推力计算如式(5)所示。

$$F_{PM} = \frac{1}{2} i_f^2 \frac{\partial L_f}{\partial x} + i_a i_f \frac{\partial L_{af}}{\partial x} \quad (5)$$

其中, i_f 为永磁体等效励磁电流, i_a 为电枢电流, L_f 为电机内自感, L_{af} 为电机内互感。

根据上述分析得到电机的基本结构模型,表 1 为单相永磁振荡电机主要结构的设计参数。

表 1 电机的主要设计参数

参数	数值/mm
定子轴向长度	81.0
动子轴向长度	70.0
PM 环厚度	3.0
PM 环宽度	16.0
PM 环极距	17.3
气隙宽度	1.0

2 直线振荡电机特性分析

2.1 电机电磁场特性分析

对本文设计的直线振荡电机采用有限元法 $R-Z$ 轴模型进行分析,在电机空载运行时间 $t=0.2$ s 时,分析得到电机的磁力线分布,如图 3 所示。电机轴向端部存在漏磁,这是由直线电机的端部效应引起的。研究发现当动子运行到不同位置时,电机内磁场分布随着永磁体位置的变化而发生改变,而交联在定子电枢绕组上的总磁通也会发生周期性的改变,实现电能和机械能的转换。

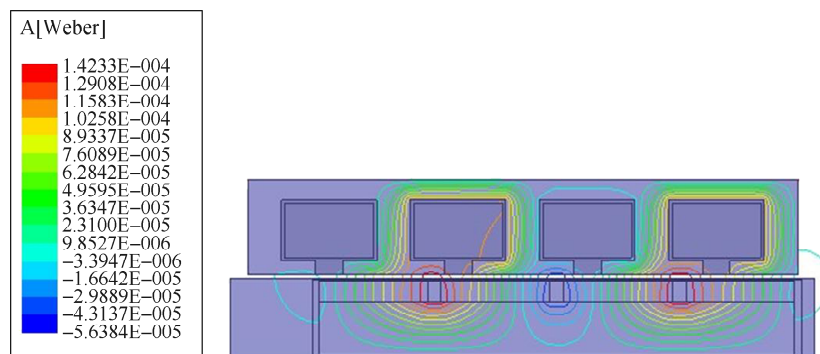


图 3 电机空载时磁力线分布($t=0.2$ s 时)

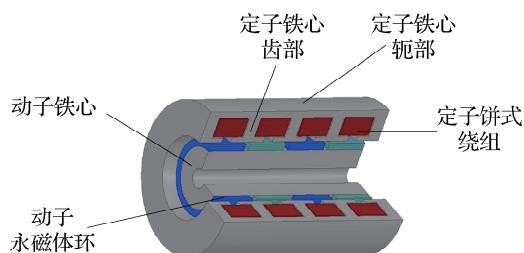


图 2 直线振荡电机结构模型

根据有限元法可计算出该直线振荡电机定子绕组的自感,计算如式(6)所示。

$$L = \frac{\psi}{I} \quad (6)$$

其中, L 为电感, I 为对应的绕组电流, ψ 为绕组线圈单位长度内交联的磁链,计算如式(7)所示。

$$\psi = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (7)$$

其中, N 为绕组匝数, Φ 为绕组对应的磁通。

根据本电机的模型采用有限元法计算出该电机绕组的自感,具体如图 4 所示,可以得到自感的平均值为 23 mH。

2.2 电动状态性能分析

根据直线振荡电机工作原理可知,当电机工作在电动状态时,电机电枢绕组中加入不同电流,得到的振荡推力有所不同。本文通过计算得出电机输入电流为 $i = 3\sin(10\pi t)$ A 时的电磁推力变化情况,如图 5 所示。需要注意的是此时计算的电磁推力为电机电流作用下的电磁力和空载时定位力的合力,最大幅值约为 102.70 N。

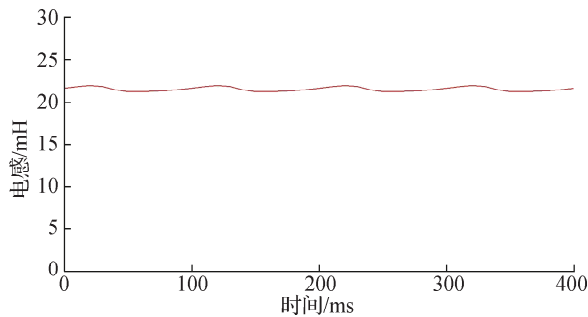


图 4 电机绕组的自感曲线

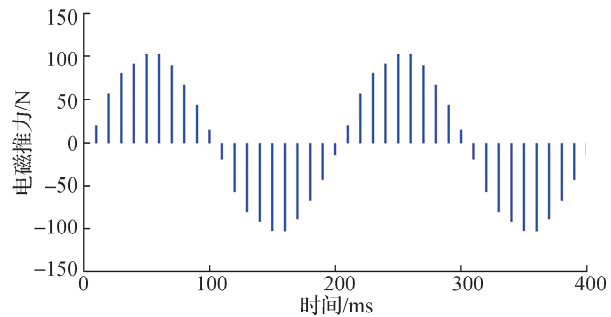


图 5 电机电磁推力变化情况

此外根据分析计算发现,在电流频率不变条件下,随着输入电流幅值的不断增加,电磁推力的幅值也逐渐增大(如表 2 所示)。

表 2 电磁推力与输入电流变化情况

输入电流幅值/A	电磁推力幅值/N
3.0	102.70
3.5	113.65
4.0	133.50
4.5	150.00
5.0	172.25

根据电机的设计指标要求,电机工作频率为 5 Hz,即振荡的周期为 200 ms,在输入电流为 $i = 3\sin(10\pi t)$ A 时,分析得出电机动子随时间的振荡位移情况,如图 6 所示,振荡的幅值范围为 11 mm。

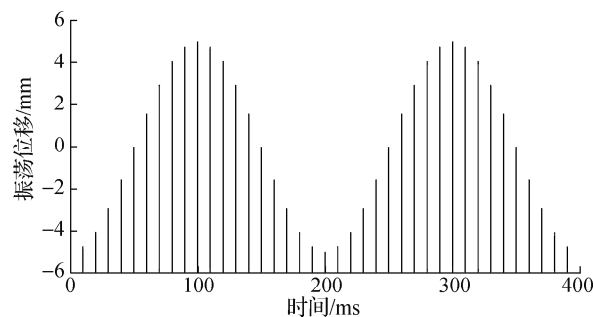


图 6 电机振荡位移情况

2.3 发电状态性能分析

当电机工作在发电机状态时,由波浪力带动电机动子运动进行发电。发电机绕组端空载电动势是振荡电机的重要指标之一,实现与发电平台其他能源互补发电。分析时,根据海况波浪平均运动速度设定电机动子的振荡速度为 $v=150\sin(10\pi t)\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,得出电机空载运行时的电枢电动势,电动势幅值为 12 V 左右。电机在发电状态时产生空载电动势的波形中含有谐波,波形的总谐波畸变率(THD)是发电机输出电能质量的一个指标,是指各次谐波有效值平方和的方根与基波有效值比值的百分数,计算如式(8)所示。

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} / U_1 \times 100\% \quad (8)$$

其中, U_1 为基波电压有效值, U_n 为电压 n 次谐波有效值。通过傅里叶分解法得出本电机空载电动势谐波分布,如图 7 所示。通过分析发现波形主要含有 5 次谐波,这是由电机自身齿槽结构(如槽距和极距比值的不同)产生的,因此可以通过改变齿槽结构和永磁体极距来进行优化。

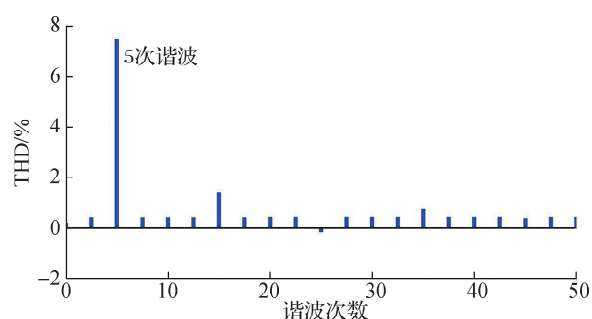


图7 振荡电机空载电动势波形谐波含量

3 电机永磁体优化

电机模型的结构参数在最初设定后需要反复优化以使电机获得最优的性能。根据上述分析可知,本文设计的永磁直线振荡电机空载时的磁场是由电机内的永磁体产生的,故永磁体的结构参数将影响电机的空载电动势波形。本电机采用永磁体环阵列结构,在动子运动行程(10 mm)和动子轴向长度(70 mm)范围内分别对不同厚度、宽度的永磁体环作用下的电机空载电动势进行计算,结果如图 8 所示。由图 8 可知,当永磁体(PM)厚度和宽度增大时,电动势的幅值也增大,但增大到一定值后增加的幅度趋于缓慢,这是由电机内磁场趋于饱和和引起的。考虑到电机的磁场饱和以及永磁体材料的加工工艺与费用,本电机采用厚度为 3 mm、宽度为 16 mm 的永磁体环。

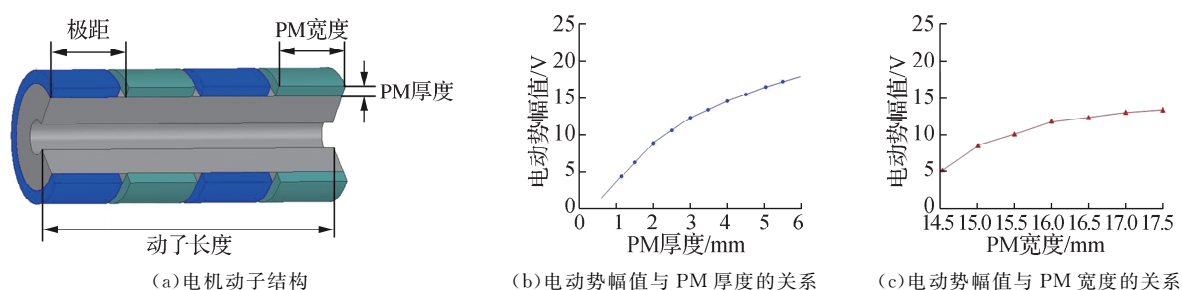


图8 电机永磁体优化情况

4 结 语

本文提出一种用于浮式发电平台的减振与互补发电的筒形单相永磁直线振荡电机的设计方法,此种电机在电动状态时进行减振,在发电状态时实现与平台的互补发电;采用有限元分析法对电机空载时的电磁场进行计算,并对电机工作在电动状态和发电状态下的相关特性进行分析,最后对电机内的永磁体环结

构进行优化。分析与计算的结果表明:1)电机采用筒形单相绕组结构可以有效提升电机内磁场的磁通密度,减小电机的体积与材料费用,提升电机单位体积的能量密度与发电效率。2)电机在振荡工作状态下,随着输入正弦电流幅值的不断增大,电机的电磁推力也不断增大,考虑电机的温升,额定的输入电流为 $i = 3\sin(10\pi t)$ A,电磁的振荡位移为 11 mm。3)合理优化电机内永磁体环结构,可以在小行程振荡范围内提高电机输出电压,降低电压波形谐波含量,提高输出电能质量。

上述分析表明,该直线振荡电机结构模型的工作原理、设计理念和优化方法适用于小功率直线振荡电机的设计与分析领域。

参考文献:

- [1] KIM J M, CHOI J Y, LEE K S, et al. Design and analysis of linear oscillatory single-phase permanent magnet generator for free-piston stirling engine systems[J]. *AIP Advances*, 2017, 7(5): 056667
- [2] SHURAIJI A L, ZHU Z Q, LU Q F. Comparative study of different doubly salient PM tubular machine topologies[C]// 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016). Glasgow: Institution of Engineering and Technology, 2016: 1-6
- [3] ISHIHARA T, ZHANG S N. Prediction of dynamic response of semi-submersible floating offshore wind turbine using augmented Morison's equation with frequency dependent hydrodynamic coefficients[J]. *Renewable Energy*, 2019, 131: 1186-1207
- [4] 孟珣, 刘萌, 唐小惠, 等. 海上大功率风力机固定式支撑结构方案比较分析[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(11): 3215-3223
- [5] BAT B J G, DOBSON R T, HARMS T M, et al. Simulation, manufacture and experimental validation of a novel single-acting free-piston Stirling engine electric generator[J]. *Applied Energy*, 2020, 263: 114585
- [6] KIM K H, PARK H I, JEONG S S, et al. Comparison of characteristics of permanent-magnet linear oscillating actuator according to laminated method of stator core[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2016, 26(4): 1-4
- [7] KIM W H, KIM C W, SHIN H S, et al. Operating characteristic analysis and verification of short-stroke linear oscillating actuators considering mechanical load[J]. *Machines*, 2022, 10(1): 48
- [8] AHMAD Z, HASSAN A, KHAN F, et al. Analysis and design of a novel outer mover moving magnet linear oscillating actuator for a refrigeration system[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 121240-121252
- [9] 于明湖, 张玉秋, 卢琴芬, 等. 动磁式横向磁通直线振荡电机设计[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2012, 46(2): 206-211
- [10] LI K, ZHANG X Q, CHEN H X. Design optimization of a tubular permanent magnet machine for cryocoolers[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2015, 51(5): 1-8
- [11] 李想, 徐伟, 叶才勇. 新型定子永磁型动铁心式横向磁通直线振荡电机[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(21): 6209-6217
- [12] 夏加宽, 李文瑞, 何新, 等. 各向异性横向磁通永磁直线电机穿片漏磁分析[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(14): 518-524

(责任编辑: 湛江)