

负载对船舶同步发电机振动的影响

黄世伦¹, 俞万能^{1,2}, 李寒林^{1,2}, 尹自斌^{1,2}, 郭隆军¹

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021, 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了研究船用发电机在稳定运行时, 不同负载对发电机电磁振动大小的影响, 首先通过理论分析阻性和感性负载下发电机内部合成磁场的变化规律, 建立电磁振动响应模型, 并运用 Maxwell 张量法推导出不同合成磁场下的电磁力波, 然后用模态叠加法计算发电机定子的振动响应, 最后通过 ANSYS Electronics 仿真与实验进行验证。结果表明, 当永磁同步发电机负载为阻性负载时, 随着有功功率的增加, 发电机各点振动增强; 负载为感性负载时, 随着内功角的减小, 发电机各点的电磁振动增强。

[关键词] 船舶同步发电机; 电磁振动; 模态叠加法; 有限元仿真

[中图分类号] TM 301

Vibration Influence Mechanism with Load for Marine Synchronous Generator

HUANG Shilun¹, YU Wanneng^{1,2}, LI Hanlin^{1,2}, YIN Zibin^{1,2}, GUO Longjun¹

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Province Key Laboratory of Naval Architecture and Marine Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to reduce the vibration of marine generator, the influences of different loads on the electromagnetic vibration of Marine generators during stable operation are studied. In this study, author focuses on the influence of various types of load, which is under a high operated stability, on the electronic vibration. The electromagnetic vibration response model was established by theoretical analysis of the variation rule of the internal synthetic magnetic field of the generator under the load of inductive or resistance. It theoretically analyses the changing regular of internal resultant field with resistor inductance load. Maxwell tensor method was applied to deduce electromagnetic waves under different synthetic magnetic fields, and modal superposition method was used to calculate the vibration response of generator stator. Maxwell tensor method is applied to deduce the magnetic waves under various resultant magnetic field. Besides, with mode superposition method, author computes the vibration response of generator stator. Finally verified by ANSYS Electronics simulation and experiment, the experimental results are consistent with theoretical analysis. The conclusion is that when the load is resistive, the vibration of the generator increases with the increase in active power. When the permanent magnet synchronous generator load is the resistive load, the electromagnetic vibration of each point of the generator increases with the Internal power angle ψ decrease.

Keywords: ship synchronous generator; electromagnetic vibration; modal superposition method; finite element simulation

[收稿日期] 2018-06-11

[修回日期] 2018-07-10

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51679106); 福建省科技重大项目(2018H6014)

[作者简介] 黄世伦(1994—), 男, 硕士生, 从事船舶电力推进及其控制研究。通信作者: 俞万能(1970—), 男, 教授, 博士, 从事船舶电力推进及其控制研究。

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

0 引言

振动噪声评价是船舶性能评估的重要组成部分,发电机产生振动的主要原因是电磁振动^[1-3],电磁振动主要是由发电机内部径向电磁力产生,而径向电磁力的大小与发电机内部电磁场相关^[4],当发电机外部负载发生变化时,定子上电枢电流随即改变,引起电机气隙内电枢磁场的变化。目前对电机电磁振动机理的研究较多,文献[5]分析了永磁体不同边缘形状之间径向电磁力的差异;文献[6]根据定子铁心模型及厚度、气隙大小等参数的不同,分别分析电磁力大小;文献[7]通过解析与仿真,计算永磁同步电机由于 PWM (pulse width modulation) 而引起的高频振动;文献[8]将电磁场、板壳振动理论、FEM (finite element method)、BEM (boundary element method) 相结合,分别分析了定子尺寸、极弧系数、转子齿数等参数对电磁力产生的影响。

从以上文献可以看出,目前大部分文献以分析电机内部结构参数对电磁力的影响为主,通过改善电机结构参数来削弱因电磁力产生的振动,而对因发电机负载的变化对电磁振动产生的影响研究较少。因此本文通过理论分析、仿真和实验相结合的方法,对不同负载下船用发电机的振动响应进行研究。

1 永磁同步发电机磁场与电磁力计算模型

当发电机正常运行时,发电机内部磁场主要包括定子电枢磁场和转子磁钢磁场,这两种磁场分别由定子电枢磁动势(F_a)和磁钢磁动势(F_f)产生。 F_a 和 F_f 产生的磁场在空间内均以同步速旋转,相对静止,相互作用,形成负载下电机内的合成磁场,因此电机内部磁场的变化取决于 F_a 与 F_f 的位置与大小。对于永磁同步发电机,磁钢励磁磁动势固定,因此电机内合成磁场主要取决于定子电枢磁动势相对于磁钢励磁磁动势的位置以及定子电枢磁动势的大小,一般称这种现象为发电机的电枢反应。而定子电枢磁动势相对于磁钢励磁磁动势的位置与电枢磁动势的大小又分别取决于发电机的内功角(ψ)与负载电流(I_a)。

永磁同步发电机基波气隙磁势为

$$f(\theta, t) = F_{\text{mag}} \cos(\omega t - p\theta) + F_{\text{coil}} \cos(\omega t - p\theta - \varphi) = F_0 \cos(\omega t - p\theta - \varphi_0) \quad (1)$$

其中: F_{mag} 为转子磁钢磁动势幅值; F_{coil} 为定子电枢磁动势幅值; ω 为电频率; p 为极对数; θ 为定子机械角度; φ 为两磁极间相位角。

船舶发电机主要包括四类负载:1) 电力拖动系统;2) 照明系统;3) 无线电设备;4) 生活用电设备。这些负载主要分为阻、感性负载以及阻感性混合负载,因此分别对发电机在三种类型的负载下内部气隙磁场进行分析。

当发电机外部负载为纯阻性负载时,功率因数角 $\varphi = 0$,内功角 $\psi = 0$ 。同步发电机时空矢量图如图 1a 所示,此时电枢反应是交轴电枢反应,气隙合成磁场加强;当有功功率不断增加,即电枢电流 I_a 增加,定子电枢磁动势 F_a 增强,因此合成磁场加强。

当发电机负载为阻感性负载时, $0^\circ < \psi < 90^\circ$,同步发电机时空矢量图如图 1b 所示,其中: E_0 为空载电动势; U 为端电压; x_s 为同步电抗。此时电枢反应是交轴兼直轴去磁电枢反应,合成磁场的轴线位置将会产生一定的偏移,幅值也有所减少。这种类型的负载在船舶正常航行中最常见, ψ 与 I_a 的大小决定合成磁场的大小。当外部负载电流保持不变时,随着内功角 ψ 的增大,磁场的去磁电枢反应会越强,合成磁场减弱。当 ψ 保持不变,随着电枢电流 $|I_a|$ 增大,磁场的去磁电枢反应会增强,合成磁场增强。

不考虑定子齿槽的影响,则气隙比

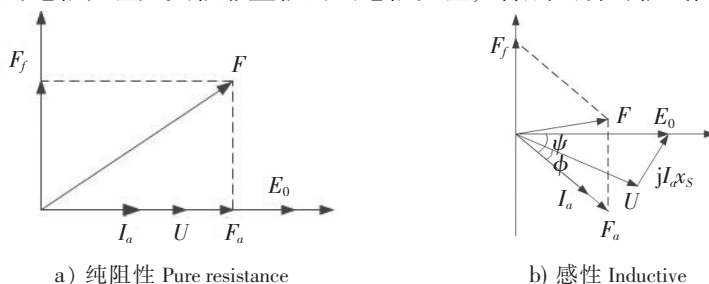


图 1 同步发电机时空矢量图

Fig.1 Synchronous generator space-time vector diagram

磁导为常量 λ_0 , 电机合成径向气隙磁密为

$$B_r(\theta, t) = f(\theta, t) \cdot \lambda_0 = B_0 \cos(2\pi f_1 t - p\theta - \varphi_0)。 \quad (2)$$

其中: B_0, f_1, θ 为因变量。

用麦克斯韦应力张量法可以得到作用在定子内表面的应力

$$p_r \approx B_r^2(\theta, t)/2\mu_0。 \quad (3)$$

其中: μ_0 为空气磁导率。

不考虑常数项, 将 (2) 式带入 (3) 式中, 可以得到发电机内电磁力波表达式为:

$$p_r \approx p_0 \cos(2\omega t - 2p\theta)。 \quad (4)$$

其中: p_0 为因变量。

2 电磁振动响应模型

在研究任何复杂的机械系统时, 均会将机械系统当做一个多自由度系统来分析, 多自由度动力学运动方程

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{f}(t)。 \quad (5)$$

式中: \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{C} 为阻尼矩阵, $\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K}$, α 和 β 为比例常数; \mathbf{K} 为刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{x}}$ 、 $\dot{\mathbf{x}}$ 、 \mathbf{x} 分别为各个节点的振动加速度、振动速度以及振动位移; $\mathbf{f}(t)$ 为外部激振力。

将 \mathbf{x} 看做是 n 个模态振型向量线性叠加, 令 $\mathbf{x} = \mathbf{s}\boldsymbol{\varphi}$ (其中: \mathbf{s} 为正则模态矩阵), 带入式 (5), 同时左右乘 $\mathbf{s}^T\mathbf{M}^{-1}$, 化简得到

$$\ddot{\boldsymbol{\varphi}} + \text{diag}(2\xi_1\omega_1, \dots, 2\xi_n\omega_n)\dot{\boldsymbol{\varphi}} + \text{diag}(\omega_1^2, \dots, \omega_n^2)\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{s}^T\mathbf{M}^{-1}\mathbf{f}。 \quad (6)$$

其中: $\ddot{\boldsymbol{\varphi}}$ 、 $\dot{\boldsymbol{\varphi}}$ 、 $\boldsymbol{\varphi}$ 分别为在模态坐标系下节点的加速度、速度、位移向量; $\omega_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为第 i 阶固有频率; $\xi_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为第 i 阶模态阻尼比, 对其理论分析比较困难, 一般采用实验方法获得, 可采用经验公式 $\xi_i = (2.76 \times 10 - 5f_m + 0.062)/2\pi$, f_m 为圆柱壳固有频率。

将式 (4) 带入式 (6), 则可以得到模态坐标系下节点的位移向量。

$$\begin{cases} \varphi_i(t) = \mathbf{s}^T\mathbf{M}^{-1}(p_{r0})\cos(2\omega t - \varphi_i)/\sqrt{[\omega_i^2 - (2\omega)^2]^2 + (4\xi_i\omega_i\omega)^2}, \\ \varphi_i = \arctan[4\xi_i\omega_i\omega/(\omega_i^2 - (2\omega)^2)]。 \end{cases} \quad (7)$$

又因 $\mathbf{x} = \mathbf{s}\boldsymbol{\varphi}$, 将式 (7) 带入可得

$$\mathbf{x} = \sum_{i=1}^n \mathbf{s}^{(i)}\mathbf{s}^T\mathbf{M}^{-1}(p_{r0})\cos(2\omega t - \varphi_i)/\sqrt{(\omega_m^2 - 4\omega_r^2)^2 + 16\xi_m^2\omega_m^2\omega_r^2}。 \quad (8)$$

其中: p_{r0} 为电磁波的幅值。

由式 (8) 可知, 振动响应大小与 p_{r0} 成正相关。根据以上的分析, 当发电机外部负载发生变化时, 引起发电机内部磁场的变化, 而外部具体的表现为发电机的振动响应。

通过电磁力计算模型和电磁振动响应计算模型理论分析可得:

1) 当纯阻性负载是发电机外部负载时, 随着有功功率的增加, 电枢电流 I_a 增大, 电机内合成磁场加强, 电机振动增强;

2) 当感性负载是发电机外部负载时, ψ 减小, 则气隙合成磁场增强, 导致气隙磁势增强, 使得发电机电磁力增大。 I_a 增大, 则气隙磁场加强, 导致发电机电磁力增大, 使得发电机振动响应增强。

3 电磁场仿真分析

运用有限元法 ANSYS Electronics 仿真软件对电机进行仿真, 求解发电机的气隙磁密, 以验证发电机气隙磁场随负载变化的规律。本文采用在 RMxpert 中建模, 结合 Maxwell2DDesign 有限元进行计算。图 2 是在稳态负载下 $t = 0.08$ s 时发电机磁密云图以及磁力线分布图。

图 3 是径向磁密在发电机内部的分布波形图。

在 RMxpert 中改变发电机激励, 在感性负载、纯阻性负载下分别对发电机的径向磁密进行仿真。

表 1 表示 $t=0.08\text{ s}$ 时发电机内部 Distance = 0 位置处纯阻性与感性负载下的气隙磁密。

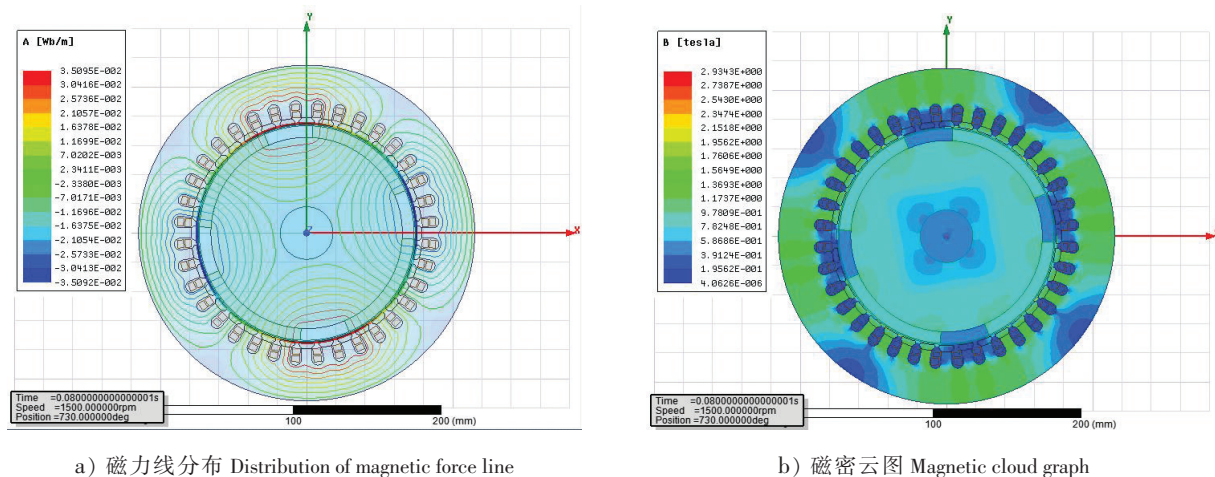


图 2 电机磁场仿真图

Fig.2 The simulation diagram of magnetic fields of a motor

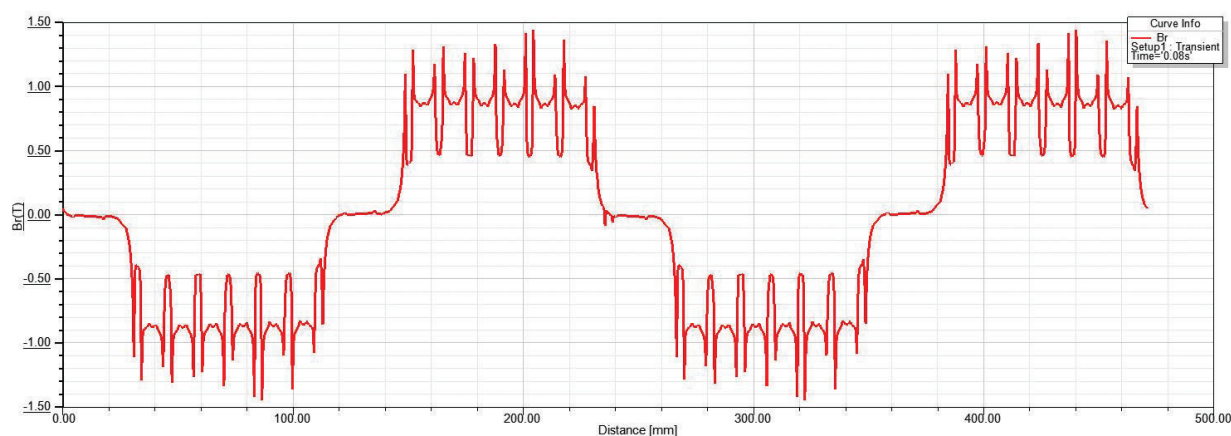


图 3 发电机径向磁密分布图

Fig.3 Radial distribution of a magnetic density distribution of a generator

表 1 发电机气隙磁密

Tab. 1 Air gap magnetic density of a generator

阻性负载 Resistive load/ Ω	气隙磁密 Air gap magnetic density/T	$ I \sin\psi/\text{rad}$	气隙磁密 Air gap magnetic density/T
95	0.053 009 995	0.427	0.072 000 161
195	0.059 428 090	0.509	0.068 852 701
295	0.061 499 032	0.588	0.067 213 540
395	0.162 512 872	0.653	0.066 634 594
495	0.063 108 643	0.863	0.066 372 338
595	0.063 510 802	1.120	0.066 209 361

由表 1 可以看出, 在纯阻性负载下, 随着发电机负载阻值增加, 气隙磁密增加; 在感性负载下,

随着 $|I|\sin\psi$ 的增加, 气隙磁密降低。

4 实验验证

实验室振动试验平台主要包括: 3 kW 的电动机一台; 3 kW 的发电机一台; 三相对称纯阻性负载一台; 三相对称感性负载一台。此次测量在发电机上一共布有 5 个测点, 编号为 1#~5#。其中: 1#测点在发电机后端盖中心位置; 2#在发电机前端盖顶部; 3#在机身; 4#与 5#分别在在发电机的左右机脚位置。布点位置实物图如图 4 所示。测量仪器主要包括: LMS SCM205 数据采集前端; 美国 PCB 加速度传感器; 装有数据分析 LMS. Test. Lab 软件的电脑一台。每次测量均在发电机稳定运行 30 s 后开始, 每次测量时间为 30 s, 测量结果用振动加速度响应均方值表示。



图 4 振动测点实物图
Fig.4 Physical map of vibration measuring points

1) 表 2 所示为纯阻性负载下发电机各点振动随功率变化规律。由表 2 可知, 当发电机负载为纯阻性负载时, 发电机各点的振动随有功功率增大而增大。

表 2 纯阻性负载下发电机各点振动随功率变化规律
Tab.2 The variation law of vibration of generator with power under pure resistive loads

有功功率 Active power/W	振动加速度 Vibration acceleration/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)				
	1#	2#	3#	4#	5#
151.0	4.8910	2.3790	2.4821	3.0729	3.0401
269.0	4.9940	2.4605	2.8479	3.1091	3.0703
388.6	5.1060	2.5301	2.4660	3.2719	3.2296
507.4	5.5440	2.7062	2.5379	3.5451	3.5072
680.2	5.9744	2.7806	2.5420	3.8069	3.7733
884.0	5.9995	2.6908	2.4128	3.8506	3.7831
989.0	6.3469	2.8560	2.4929	4.0499	4.0105
1105.2	6.4029	2.8839	2.5415	4.1110	4.0676
1227.1	6.6410	3.0109	2.6991	4.2298	4.2002
1400.9	6.6779	3.0339	2.8006	4.2800	4.2281
1550.2	6.9950	3.2959	2.9831	2.4850	4.4451
1669.2	7.3290	3.5698	3.2451	4.7598	4.7212
1819.5	7.7139	3.8712	3.5501	5.0610	5.0190
1965.4	7.8941	4.0260	3.6990	5.1142	5.0742

2) 表 3 为总输出功率分别为 679 W, 880 W, 988 W 三种工况下, 发电机各点的振动随 ψ 变化的规律, 从表 3 可以看出, 随着 ψ 的减小, 发电机各个点的振动加速度不断增强。

表 3 不同功率因数下发电机各点振动随 ψ 变化规律
Tab.3 The vibration of the generator varies with ψ at different power factors

总功率/W	ψ/rad	振动加速度 Vibration acceleration/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)				
		1#	2#	3#	4#	5#
679	0.832	5.1020	2.5241	2.3794	2.3794	3.1763
	0.539	5.4311	2.7161	2.4763	3.4740	3.4165
	0.487	5.5531	2.7559	2.7498	3.5491	3.4992
	0.487	5.9803	2.8009	2.5423	3.8105	3.7813
880	0.832	5.4623	2.6026	2.4961	3.4516	3.4081
	0.539	5.5191	2.7290	2.7531	3.4820	3.4435
	0.487	5.7021	2.7828	2.8392	3.6141	3.5691
	0.487	5.9899	2.7921	2.5630	3.8506	3.7734
988	0.832	5.8611	2.7264	2.3246	3.6201	3.5629
	0.539	5.9731	2.7811	2.4609	3.7216	3.6577
	0.487	6.0822	2.8349	2.4810	3.8025	3.7223
	0.487	6.3471	2.8759	2.5929	4.0105	4.0631

5 总结

本文以船用发电机为研究对象,分别在纯阻性负载与感性负载下对发电机电磁振动规律进行分析,并通过实验进行验证,得出以下两点结论:

1) 当负载为纯阻性负载时,随着有功功率的增加,发电机各点的电磁振动增大。这是因为此时发电机的电枢反应为交轴电枢反应,磁场加强,当外部负载增大,发电机输出有功功率增加,电枢电流 I_a 增大,合成磁场增强,发电机内部电磁力增大,发电机振动增大。

2) 当负载为感性负载时,随着 ψ 的减小,发电机各点的电磁振动增强。此时电枢反应为交轴兼直轴去磁电枢反应,去磁反应越弱,交轴作用加强,气隙磁场有所加强,在 $\psi = 0$ 时气隙合成磁场产生的振动相比于其他磁场来说最大。

[参 考 文 献]

- [1] 吴胜男. 非晶合金永磁电机电磁振动噪声研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- [2] 何志伟. 小功率永磁同步电机电磁振动与噪声分析 [D]. 上海: 上海电机学院, 2016.
- [3] 舒波夫. 电机的噪声和振动 [M]. 沈官秋, 译. 北京: 机械工业出版社, 1980.
- [4] KO H, KIM K. Characterization of noise and vibration sources in interior permanent - magnet brushless DC motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(6): 3482-3489.
- [5] 杨浩东. 永磁同步电机电磁振动分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [6] 时方敏. 永磁同步电机电磁振动及噪声分析研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.
- [7] 王东刚. 永磁同步电机高频振动与噪声研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [8] 何皓环. 永磁有刷直流电动机电磁振动与噪声的分析 [D]. 上海: 上海交通大学, 2012.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)