

气隙偏心下永磁风力发电机定子 电磁振动特性分析^{*}

张 存¹, 沈意平¹, 阳雪兵², 杨 波², 时 或¹

(1. 湖南科技大学 机械设备健康维护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

2. 哈电风能有限公司, 湖南 湘潭 411100)

摘 要: 永磁风力发电机定转子偏心会造成发电机气隙分布不均匀而产生磁场不平衡, 使发电机振动加剧, 严重时甚至引发转子扫膛, 使发电机损坏失效。以某兆瓦级永磁风力发电机为研究对象, 理论分析了气隙偏心对发电机气隙磁密和径向电磁力的影响, 对于不同气隙偏心量下的风力发电机瞬态电磁场开展有限元分析, 获得气隙磁密和径向电磁力分布特性变化规律, 进而开展径向电磁力作用下定子谐波响应分析, 以掌握气隙偏心引起的定子振动响应特性。结果表明: 随着气隙偏心量的增加, 气隙最小处气隙磁密幅值增大, 径向电磁力新增边带分量; 发电机定子振动响应中工作频率的倍频幅值也随之增大, 其中二阶径向模态响应幅值最大。所得结果可为发电机气隙监测方法研究提供一定的理论依据。

关键词: 永磁风力发电机; 气隙偏心; 气隙磁密; 径向电磁力; 电磁振动

中图分类号: TM313 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)04-0053-07

doi: 10.12177/emca.2021.223

Electromagnetic Vibration Characteristics Analysis of Permanent Magnet Wind Generator Under Air Gap Eccentricity^{*}

ZHANG Cun¹, SHEN Yiping¹, YANG Xuebing², YANG Bo², SHI Yu¹

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Harbin Electric Corporation Wind Power Co., Ltd., Xiangtan 411100, China)

Abstract: The rotor eccentricity of permanent magnet wind generator will cause uneven distribution of generator air gap and magnetic field imbalance, which aggravate the vibration of the generator, and even cause rotor scrapping in serious cases and result in generator damage and failure. Taking a MW-class permanent magnet wind generator as the analysis object, the influence of air gap eccentricity on generator air gap flux density and radial electromagnetic force is analyzed theoretically. Finite element analysis of transient electromagnetic field of wind generators under different air gap eccentricities is performed, and the distribution characteristics of air gap flux density and radial electromagnetic force under different air gap eccentricities are obtained. Harmonic response analysis of the stator under the radial electromagnetic force is conducted to obtain the response characteristics of the stator caused by air gap eccentricity. The results show that with the increase of air gap eccentricity, the amplitude of air gap density is increased, and new side band components of radial electromagnetic force appear. The amplitudes of harmonics of the operating frequency in the vibration response of generator stator also increase, and the amplitude of the second order

收稿日期: 2021-12-14; 收到修改稿日期: 2022-03-23

^{*} 基金项目: 湖南创新型省份建设专项经费项目(2020RC3049); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ6029)

作者简介: 张 存(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁发电机故障诊断。

沈意平(1981—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为风电技术与装备、机械动力与故障诊断。(通信作者)

radial mode response is the largest. The results can provide a certain theoretical basis for the research of generator air gap monitoring method.

Key words: permanent magnet wind generator; air gap eccentricity; air gap flux density; radial electromagnetic force; electromagnetic vibration

0 引言

永磁直驱风力发电机通过增加磁极对数使发电机额定转速下降,无需增速齿轮箱,可以通过叶轮转动直接驱动发电机发电。永磁风力发电机尺寸大、结构复杂,制造与安装误差容易造成定转子偏心,将使发电机内部气隙磁密分布不均匀而产生不平衡磁拉力,加剧定转子振动,长期服役条件下气隙偏心状态不断加剧,严重时甚至引发转子扫膛,使发电机损坏失效^[1-2]。因此,开展气隙偏心状态下永磁风力发电机电磁振动特性分析,掌握气隙偏心量对发电机径向电磁力和定子振动响应特性的影响,是发电机气隙偏心监测的基础问题,对于保证风电机组的安全稳定运行具有重要意义。

针对气隙偏心下汽轮发电机组的电磁振动,何玉灵等^[3-4]考虑到转子振动检测困难,提出利用定子通频振动特性变化来鉴定气隙偏心程度,得出静偏心将引发定子二倍频振动加大,动偏心与动静混合偏心将引发定子一至四倍频振动均增大。谢颖等^[5]分析了气隙偏心和绕组短路联合故障对汽轮发电机电磁振动的影响,指出气隙静偏心使得气隙磁密二次谐波增大,径向电磁力中的二倍频分量随着气隙偏心程度增加而增大。针对气隙偏心下永磁同步电机磁场理论分析,研究者们采用子区域法^[6-7]、等效剩磁法^[8-9]、全局解析法^[10-11]等方法分析气隙磁密、径向电磁力、不平衡磁拉力,结合模拟样机试验研究,指出电磁力新增空间阶次将导致电机转子振动水平加剧。对于永磁同步风力发电机,季洁等^[12]开展了 1.2 MW 发电机的电磁场仿真分析,得出发电机气隙偏心后气隙磁密出现严重不对称,且 7 次谐波分量较大。Safa 等^[13]开展了气隙偏心下永磁同步发电机电学性能仿真,提出利用定子电压频谱特定频率的边带分量检测气隙偏心故障。

针对永磁风力发电机气隙偏心的研究主要集中在电磁分析上,且从电磁角度上少有鉴定气隙偏心严重程度的研究,存在较大不足。从定子电磁振动量来鉴定气隙偏心程度具有可行性^[3]。因

此,本文以哈电风能有限公司研发的兆瓦级永磁风力发电机为研究对象,首先分析气隙偏心下发电机气隙磁密和径向电磁力的理论解析式,然后采用电磁-结构耦合有限元仿真方法,分析不同气隙偏心下发电机的气隙磁密、径向电磁力分布特性及定子振动响应特性,为运行状态下发电机气隙监测方法研究提供一定的理论依据。

1 永磁风力发电机电磁理论分析

本文以某兆瓦级永磁同步风力发电机为研究对象。风力发电机定转子偏心,气隙分布不均匀,如图 1 所示。假定风力发电机定子中心为 O ,转子发生偏心后其旋转中心为 O' ,定义 ζ 为转子偏心量,则任意位置气隙长度表达式为

$$\delta(\theta, t) = \delta_0 - \zeta \cos \theta = \delta_0 \left(1 - \frac{\zeta}{\delta_0} \cos \theta \right) \quad (1)$$

式中: θ 为 t 时刻的机械转动角; δ_0 为未偏心时气隙长度。

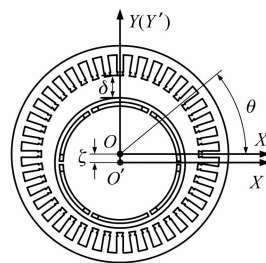


图 1 风力发电机气隙偏心示意图

由于永磁同步风力发电机转速低,且转子负载大,定转子主要表现为静偏心。本文假定风力发电机转子与定子圆心不重合,转子只围绕自身圆心旋转。

风力发电机气隙未偏心时,径向气隙磁密为磁动势与气隙磁导乘积^[11]。气隙磁密表达式为

$$b_n(\theta, t) = f(\theta, t) \lambda(\theta, t) \quad (2)$$

式中: $f(\theta, t)$ 为永磁风力发电机运行时气隙磁动势; $\lambda(\theta, t)$ 为单位面积气隙磁导。

风力发电机气隙磁动势表达式为

$$f(\theta, t) = \sum_{\mu} F_{\mu} \cos(\mu\theta - \mu\omega t/p) \quad (3)$$

式中: F_μ 为 μ 阶磁动势波幅值; ω 为电流基波角速度; μ 为磁动势空间阶数, $\mu = (2m + 1)p, m = 1, 2, 3, \dots$; p 为极对数。

考虑定子开槽对气隙磁导的影响, 发电机电磁导表达式为

$$\lambda(\theta, t) = \Lambda_0 + \sum_l \Lambda_l \cos(lZ\theta) \quad (4)$$

式中: Λ_0 为磁导不变分量; Λ_l 为磁导 l 次谐波分量幅值; Z 为定子槽数。

将式(3)、式(4)代入式(2), 可得风力发电机气隙未偏心时的径向气隙磁密表达式为

$$b_n(\theta, t) = f(\theta, t) \lambda(\theta, t) = \sum_\mu F_\mu \Lambda_0 \cos(\mu\theta - \mu\omega t/p) + \sum_l \sum_\mu \frac{\Lambda_l F_\mu}{2} \cos[(\mu \pm lZ)\theta - \mu\omega t/p] \quad (5)$$

风力发电机气隙产生静偏心后, 引进偏心磁导修正系数, 可得气隙静偏心后的气隙磁场强度。由于气隙磁导与气隙长度成反比^[14], 故偏心气隙磁导与正常气隙磁导比值为静偏心磁导修正系数^[11]:

$$\varepsilon(\theta, t) = \frac{1}{\left(1 - \frac{\zeta}{\delta_0} \cos\theta\right)} \quad (6)$$

对其进行傅里叶级数展开可得:

$$\varepsilon(\theta, t) \approx \lambda_0 + \lambda_1 \cos\theta \quad (7)$$

式中: λ_0 为气隙磁导修正系数不变分量; λ_1 为气隙磁导修正系数傅里叶展开一次谐波分量^[11]。

综上, 偏心状态下的气隙磁导表达式为

$$\lambda^*(\theta, t) = \varepsilon(\theta) \lambda(\theta) \quad (8)$$

气隙静偏心运行时气隙磁密表达式为

$$b_n^*(\theta, t) = b_n(\theta, t) \lambda^*(\theta, t) = \sum_\mu F_\mu \Lambda_0 \lambda_0 \cos(\mu\theta - \mu\omega t/p) + \sum_l \sum_\mu \frac{\Lambda_l F_\mu \lambda_0}{2} \cos[(\mu \pm lZ)\theta - \mu\omega t/p] + \sum_\mu F_\mu \Lambda_0 \lambda_1 \cos[(\mu \pm 1)\theta - \mu\omega t/p] + \sum_l \sum_\mu \frac{\Lambda_l F_\mu \lambda_1}{2} \cos[(\mu \pm lZ \pm 1)\theta - \mu\omega t/p] \quad (9)$$

风力发电机气隙磁场相互作用, 产生随时间和空间变化的电磁力波。根据麦克斯韦张量方程, 作用在定子齿上单位面积的径向电磁力值 p_n 为

$$p_n = \frac{b_n^2}{2\mu_0} \quad (10)$$

式中: b_n 为径向气隙磁密, μ_0 为真空磁导率。

永磁同步发电机的径向电磁力表达式为

$$p_n = p_a + p_b + p_c \quad (11)$$

式中: p_a 、 p_b 、 p_c 为 p_n 分解项, 表达式为

$$p_a = \sum_{\mu_1} \sum_{\mu_2} \frac{F_{\mu_1} F_{\mu_2} \Lambda_0^2}{4\mu_0} \cos[(\mu_1 \pm \mu_2)\theta - (\mu_1 \pm \mu_2)\omega t/p] \quad (12)$$

$$p_b = \sum_{\mu_1} \sum_{\mu_2} \sum_l \frac{F_{\mu_1} F_{\mu_2} \Lambda_0 \Lambda_l}{4\mu_0} \cos[(\mu_1 \pm \mu_2 \mp lZ)\theta - (\mu_1 \pm \mu_2)\omega t/p] \quad (13)$$

$$p_c = \sum_{\mu_1} \sum_{\mu_2} \sum_{l_1} \sum_{l_2} \frac{F_{\mu_1} F_{\mu_2} \Lambda_{l_1} \Lambda_{l_2}}{16\mu_0} \cos[(\mu_1 \pm \mu_2 \pm l_1 Z \mp l_2 Z)\theta - (\mu_1 \pm \mu_2)\omega t/p] \quad (14)$$

根据 μ_1 与 μ_2 取值对以上表达式进行归纳, 径向电磁力空间阶次 r 可表示为 $2mp$ 和 $2mp \pm lZ$, 时间频率为 $2kf$, k 和 m 取正整数, 基准频率 f 为永磁同步风力发电机产生的电流频率。结合式(5)、式(9)与式(10)可知, 气隙偏心将引入径向电磁力空间阶次 $2mp \pm 1$ 和 $2mp \pm lZ \pm 1$ 即 $r \pm 1$ 的边带分量。

2 气隙偏心下发电机电磁仿真分析

本文采用电磁-结构耦合有限元仿真分析方法来研究不同气隙偏心下风力发电机定子电磁振动。开展兆瓦级永磁同步风力发电机的电磁仿真, 得到不同气隙偏心量下的气隙磁场与径向电磁力; 考虑到定子振动检测方便, 将径向电磁力加载到定子结构, 分析不同气隙偏心下定子的谐响应特性。

2.1 风力发电机电磁有限元分析模型

研究的兆瓦级永磁同步风力发电机转速为 15 r/min, 槽数为 384, 极对数 p 为常数, 功率为 5 200 kW, 气隙静偏心量 ζ 设为 1、2、3 mm。采用 Maxwell 软件进行该永磁风力发电机磁场有限元建模与分析。为保证电磁分析结果的准确性, 气隙、永磁体、绕组部分至少细划 4 层网格, 网格大小约为 2 mm。发电机整体有限元网格数量为

1.5×10^6 左右,其整体和局部加密网格如图 2 所示。开展空载电磁分析,激励方式为电流源激励,幅值为 0,定子模型边界设为不漏磁。考虑到风力发电机转速为 15 r/min,仿真分析时长为 0.4 s,时间步长设置为 0.005 s。

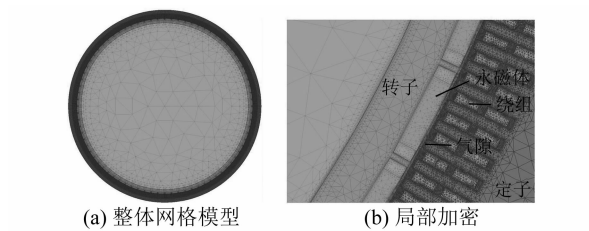


图 2 发电机电磁有限元网格模型

2.2 气隙偏心对气隙磁密的影响

通过运行 Maxwell 软件进行求解,可以获得不同气隙偏心下风力发电机气隙磁密分布情况。为了获得气隙磁密分布,定义图 3 所示的圆周气隙磁场求解积分路径。

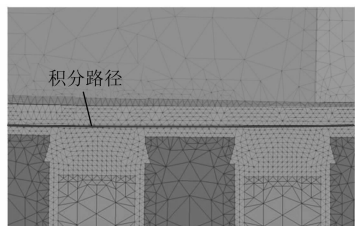


图 3 气隙磁场积分路径局部放大图

提取气隙圆周积分路径上的径向气隙磁密,不同时刻和圆周角度的气隙磁密如图 4 所示。由于气隙磁导与气隙长度成反比,故气隙偏心时气隙最小处磁密最大,气隙最大处磁密最小。进一步地,提取同一时刻圆周积分路径上的气隙磁密,如图 5 所示。从图 4 和图 5 可以看出,气隙偏心量从 1 mm 增加到 3 mm 时,发电机旋转时圆周气隙磁密产生的不均匀程度加剧。

提取出不同时刻气隙最小处的气隙磁密,如图 6 所示。正常工况下其最大幅值为 1.31 T,气隙偏心量为 1、2、3 mm 时,气隙最小处的气隙磁密最大幅值分别为 1.40、1.43、1.65 T。对不同气隙偏心量下气隙最小处的气隙磁密时域波形进行快速傅里叶变换(FFT),可以得到各次谐波幅值,结果如表 1 所示。基波与各阶谐波幅值随着气隙偏心量增大而增加,频率成分主要表现为奇数倍频,与式(9)理论分析一致,其中 5 次谐波幅值较大。

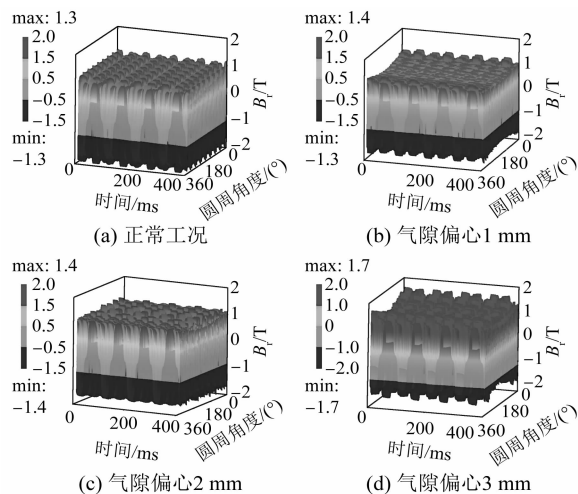


图 4 不同气隙偏心量下气隙磁密

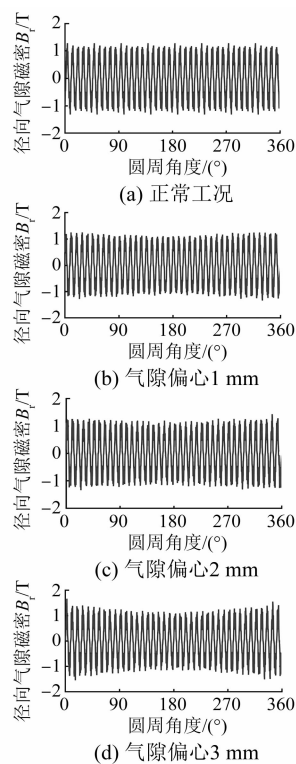


图 5 某一时刻圆周气隙磁密

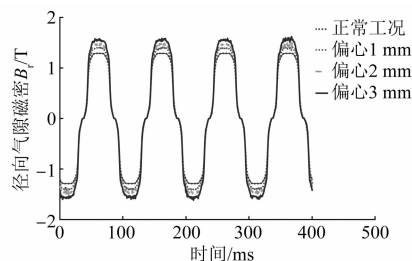


图 6 气隙最小处气隙磁密

表 1 气隙最小处气隙磁密 FFT 分解结果

偏心量/mm	谐波幅值/T			
	1f	3f	5f	7f
0	1.31	0.06	0.12	0.09
1	1.40	0.06	0.13	0.10
2	1.43	0.07	0.15	0.11
3	1.65	0.08	0.16	0.12

2.3 气隙偏心对径向电磁力的影响

通过 Maxwell 软件求解,可以获得不同气隙偏心下风力发电机径向电磁力情况。提取气隙圆周积分路径上的径向电磁力,不同时刻和圆周角度的径向电磁力如图 7 所示。由于作用在定子齿上的径向电磁力与气隙磁密的平方成正比,发电机旋转时,气隙偏心量越大,定子承受的不均匀径向电磁力波动程度越强。

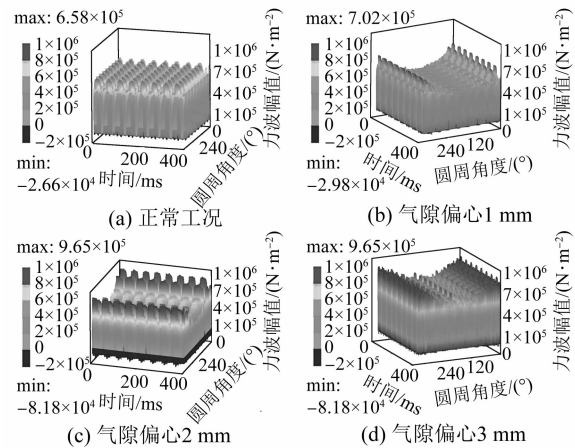


图 7 不同气隙偏心量下径向电磁力

对不同气隙偏心下风力发电机径向电磁力进行时间和空间的二维 FFT 分析。图 8(a)所示为正常工况下径向电磁力二维 FFT 分解,图 8(b)和图 8(c)分别为不同气隙偏心量下径向电磁力随频率与空间阶次的变化。可以看出:

(1) 正常工况下,发电机径向电磁力空间阶次与频率组合(0,0)、(2p,2f)、(4p,4f)、(6p,6f)、(8p,8f)对应式(11)~式(14)中径向电磁力的(2mp,2kf);空间阶次与频率组合(10p-384,10f)、(12p-384,12f)、(14p-384,14f)、(16p-384,16f)对应径向电磁力的(2mp±lZ,2kf)。

(2) 气隙偏心情况下,径向电磁力频率不变,新增了幅值较大的空间阶次 1、10p-385 和 10p-

383 的边带分量,且新增的空间阶次分量幅值随着气隙偏心量的增大而增加。根据式(11)~式(14),当 m 为 5 且 l 为 1 时,2mp±lZ 对应的空间阶次为 10p-384,对应的新增空间阶次为 10p-385 和 10p-383。

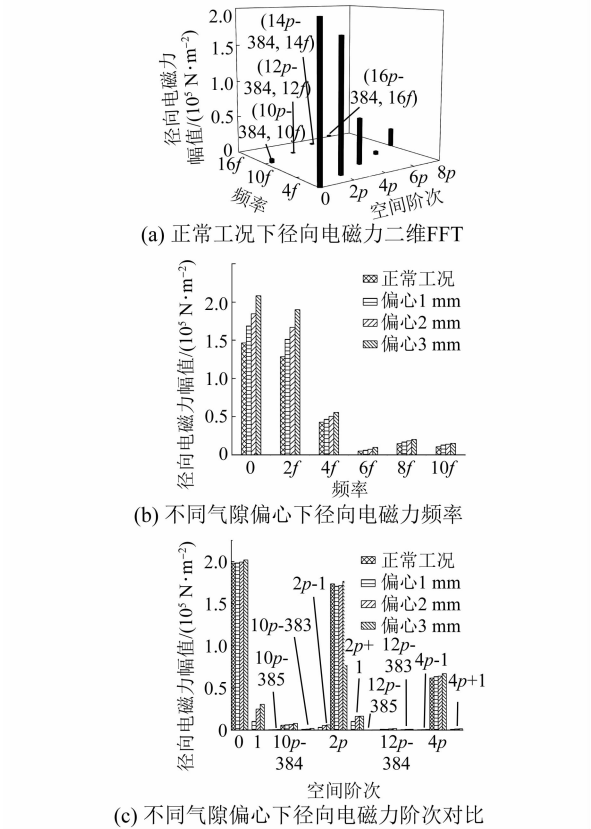


图 8 径向电磁力二维 FFT 分解结果

3 气隙偏心下发电机定子振动分析

3.1 定子模态分析

本文采用 Maxwell 联合 ANSYS Workbench 进行永磁同步风力发电机定子谐波响应分析。采用 Solid185 单元来建立定子有限元网格模型。定子端盖材料参数为弹性模量 1.70×10^{11} Pa,泊松比 0.30,密度 $7\,850\text{ kg/m}^3$;定子绕组参数为:弹性模量 1.60×10^{11} Pa,泊松比 0.30,密度 $7\,450\text{ kg/m}^3$ 。定子网格尺寸设为 20 mm,单元总数约为 1.21×10^6 。定子右侧面与塔筒结构连接,该侧面施加约束。有限元分析模型如图 9 所示。

发电机定子模态振型以空间节点数 s 描述,各阶振型如图 10 所示。采用完全法求解定子低阶模态,得到定子各阶模态振型和频率,如图 11 所示。



图9 定子结构有限元模型

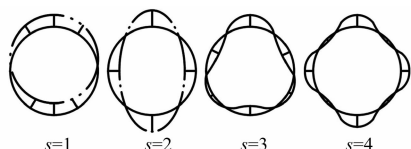


图10 定子模态振型的节点数

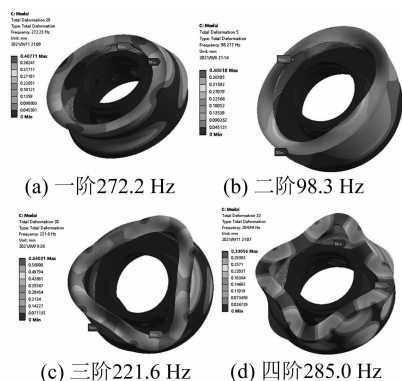


图11 定子模态振型与频率

3.2 气隙偏心下定子谐波响应分析

将 Maxwell 中径向电磁力与电磁转矩施加到发电机定子齿面上,如图 12 中 X 方向,采用完全法开展定子谐波响应分析。在图 12 中 A 点处提取定子外壳 Y 方向振动响应加速度,不同气隙偏心量下该点的振动响应加速度如图 13 所示。

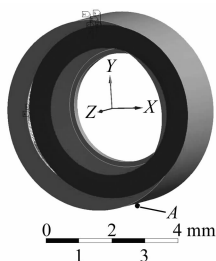


图12 施加径向电磁力的定子有限元分析模型

从图 13 可以看出,不同气隙偏心量下,定子工作频率的倍频响应增大,其中振动响应幅值出

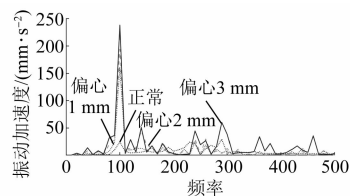


图13 A点处定子外壳Y方向的振动加速度

现的频率约为 100 Hz。根据式(5)、式(9)与式(10),径向电磁力的最小空间阶数与频率组合为 $(10p-384, 10f)$,即频率为 100 Hz。由于该频率接近定子二阶径向振动频率 98.3 Hz,故该频率响应幅值较大。

4 结 语

本文以某兆瓦级永磁同步风力发电机为研究对象,分析了不同气隙偏心量下发电机定子电磁振动响应情况,得出以下结论:

(1) 随着气隙偏心量增大,气隙最小处的气隙磁密最大幅值变大,基波与各阶谐波幅值同样变大,其中 5 次谐波幅值较大。在气隙偏心情况下,发电机径向电磁力频率不变,但是径向电磁力新增空间阶次为 $r \pm 1$ 的边带分量。

(2) 在气隙偏心情况下,定子 10 倍频响应最大,这主要是由于该频率接近定子二阶径向振动频率。定子倍频响应随着气隙偏心量的增大而增大。

【参考文献】

- [1] KIM D, NOH M D, PARK Y W. Unbalanced magnetic forces due to rotor eccentricity in a toroidally wound BLDC motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7): 8203204.
- [2] LI X, HE J, ZHAO Y, et al. Analysis of vibration characteristics of rotor eccentricity for generator in a mobile power station [J]. Journal of Physics Conference Series, 2021, 1732: 012152.
- [3] 何玉灵,万书亭,唐贵基,等.基于定子振动特性的汽轮发电机气隙偏心故障程度鉴定方法研究[J].振动与冲击,2012,31(22): 53.
- [4] 何玉灵,张伯麟,仲昊,等.汽轮发电机气隙偏心故障下的定子受力分析[J].大电机技术,2017(5): 11.
- [5] 谢颖,刘海东,李飞,等.同步发电机偏心与绕组短

- 路故障对磁场及电磁振动的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(8): 2034.
- [6] LI Y, LU Q, ZHU Z Q, et al. Superposition method for cogging torque prediction in permanent magnet machines with rotor eccentricity [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(6): 8103710.
- [7] LI Y, LU Q, ZHU Z Q. Unbalanced magnetic force prediction in permanent magnet machines with rotor eccentricity by improved superposition method [J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(6): 1095.
- [8] 任杰, 王秀和, 赵文良, 等. 永磁同步电机气隙偏心空载气隙磁场解析计算[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(8): 26.
- [9] 邢泽智, 王秀和, 赵文良, 等. 表贴式永磁同步电机电磁激振力波计算与定子振动特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 5004.
- [10] 李琛, 章跃进, 周晓燕, 等. 定子开槽表贴式永磁电机气隙偏心空载气隙磁场全局解析法[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(10): 27.
- [11] 李全峰, 黄厚佳, 黄苏融, 等. 表贴式永磁电机气隙偏心故障快速诊断研究[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(12): 48.
- [12] 季洁, 何山, 王维庆, 等. 大型永磁风力发电机偏心故障计算与分析[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(10): 96.
- [13] SAFA H H, EBRAHIMI M, ZARCHI H A, et al. Eccentricity fault detection in permanent magnet synchronous generators using stator voltage signature analysis [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017, 18(12): 1731.
- [14] 戈宝军, 毛博, 林鹏, 等. 无刷双馈电机气隙偏心对气隙磁场的影响[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 502.

(上接第 23 页)

- [8] 李耀华, 周逸凡, 赵承辉, 等. 表贴式永磁同步电机磁链和转矩无差拍控制系统[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(1): 1.
- [9] 李耀华, 周逸凡, 赵承辉, 等. 基于拓展电压矢量集合的表贴式永磁同步电机磁链和转矩无差拍控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(10): 7.
- [10] 李耀华, 周逸凡, 秦玉贵, 等. 永磁同步电机磁链和转矩无差拍控制[J]. 微电机, 2021, 54(4): 36.
- [11] 李耀华, 周逸凡, 赵承辉, 等. 基于拓展电压矢量集合的永磁同步电机无差拍控制[J]. 微特电机, 2021, 49(3): 40.
- [12] 戴文战, 娄海川, 杨爱萍. 非线性系统神经网络预测控制研究进展[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(5): 521.
- [13] 李涉川. 基于深度学习的内嵌式永磁同步电机 MTPA 预测与控制[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2019.
- [14] 李耀华, 赵承辉, 周逸凡, 等. 基于卷积神经网络和直接转矩控制的永磁同步电机模型预测转矩控制策略[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(9): 8.
- [15] 谷鑫, 胡升, 史婷娜, 等. 基于神经网络的永磁同步电机多参数解耦在线辨识[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 114.
- [16] 耿建平, 闫俞佰, 熊光阳, 等. 基于 BP 神经网络的永磁同步电机转矩观测器设计[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(1): 78.
- [17] 厉亚强, 张文涛, 李涉川. 基于 ELM 实现的 IPMSM 转矩观测器[J]. 微特电机, 2019, 47(5): 50.
- [18] 李耀华, 师浩浩, 孟祥臻. 表面式永磁同步电机直接转矩控制系统简化预测控制策略[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(4): 96.
- [19] 李耀华, 杨启东, 刘洋, 等. 表面式永磁同步电机模型预测直接转矩控制备选电压矢量集合研究[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(10): 87.
- [20] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 等. 永磁同步电机模糊自适应变开关次数权重系数模型预测转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(2): 102.