

电励磁双凸极发电机偏心特性研究

周凡, 崔江*, 杨静

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏南京 211106)

Eccentricity Characteristics of Doubly Salient Electromagnetic Generator

ZHOU Fan, CUI Jiang*, YANG Jing

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 211106, China)

Abstract: For the static eccentricity fault of the doubly salient electromagnetic generator, firstly, the equivalent analytical model of the air gap length of the generator is carried out. The theoretical relationships between the degree of static eccentricity and important characteristics such as magnetic flux linkage, electromagnetic torque, and air-gap magnetic density are derived. And then, a 2D finite element model of a 12/8 three-phase electrically excited salient-pole synchronous generator is established using Ansys finite element analysis, and the theoretical analysis results of electromagnetic signals are verified. Finally, the radial vibration signals of the generator are simulated through the coupled electromagnetic, modal, and harmonic response analysis modules in Workbench. The research findings show that the simulation results are basically consistent with the theoretical analysis, confirming that the eccentricity ratio in static eccentricity faults has a certain impact on the performance of the electrically excited salient-pole synchronous generator, thus providing a theoretical foundation for subsequent diagnoses of its static eccentricity faults.

Key words: doubly salient electromagnetic generator; static eccentricity fault; finite element analysis

摘要: 针对电励磁双凸极发电机静态偏心故障,首先对于发电机的气隙长度进行了等效解析建模,并对静偏心程度与磁链、电磁转矩以及气隙磁密等重要特性的关系进行了理论推导。然后,通过 Ansys 有限元建立 12/8 三相电励磁双凸极发电机的 2D 有限元模型,并对电磁信号理论分析结果进行验证。最后,利用 Workbench 中耦合电

磁、模态与谐响应分析模块对发电机的径向振动信号进行有限元仿真。研究表明,仿真结果与理论分析结果基本吻合,证明静偏心故障中偏心率对于电励磁双凸极发电机性能具有一定的影响,为后续其静偏心故障诊断提供理论基础。

关键词: 电励磁双凸极发电机; 静偏心故障; 有限元分析

0 引言

电励磁双凸极发电机 (Doubly Salient Electromagnetic Generator, DSEG) 具有结构简单、可控性高等优点,适合应用于航空航天等极端工作环境中^[1-2]。尽管 DSEG 在出厂前均经过转轴对中校准,但在特殊工况下仍可能发生偏心故障,且偏心故障作为发电机机械故障中较为容易发生的一类,在故障早期电信号现象中变化并不明显,难以实现故障快速检测。极端环境使信号易受干扰,从而增加了传统故障检测方法判定电机状态的难度。发电机发生偏心故障后,气隙磁密不均匀与磁路不对称引起的不平衡磁拉力则会加剧定转子振动,削减发电机使用寿命,甚至发生扫膛起火。因此,研究 DSEG 在发生静偏心故障时的特性对于确保其安全稳定运行至关重要。

在凸极同步发电机中,偏心故障占总故障比例近 40%^[3],此类故障包含静偏心 (Static Eccentricity, SE)^[4]、动偏心 (Dynamic Eccentricity, DE)^[5] 和混合偏心 (Mixed Eccentricity, ME)^[6] 等类型。其中静偏心通常指转子相对于定子中心线的偏移,这种偏心不随着转子旋转而改变位置;动偏心则是指转子在旋转时其轴线相对于定子轴线的偏移,这种偏移随着转子的旋转而周期性变化;混合偏心结合了前两

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (NS2021021); 航空科学基金项目 (201933052001)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (NS2021021); Aviation Science Foundation Project (201933052001)

种偏心的特点,即转子在旋转时,其偏心位置既有固定的偏移又有周期性的变化。通常静偏心中恒定的偏差会导致持续的不平衡状态,相较于动偏心与混合偏心故障几率更大。针对发电机静偏心故障,国内外学者已进行了深入研究。文献[7-9]将发电机偏心故障下气隙长度区域进行划分,根据不同角度下定转子重合面积计算出气隙长度理想数学模型,并联等效叠加上各区域气隙磁导;文献[10]通过对永磁同步电机在空载静偏心条件下的气隙磁密进行等效变换和建模,提高了数学模型的准确性。电磁特性作为发电机健康的直接体现,对其进行精准分析具有重要意义。文献[4]对开关磁阻电机在静态偏心情况下的电磁特性进行了理论分析;文献[11]分析了同步发电机在静态偏心状态下的电磁转矩特性。试验结果显示,电磁转矩的平均值和二倍谐波分量与偏心率的增加呈正相关;文献[12]研究了静偏心下同步发电机定子绕组的温度特性,发现偏心故障后电枢绕组的温度与铜耗均高于正常运行状态。文献[13]分析了永磁发电机偏心对气隙磁密和径向电磁力的影响,并通过有限元仿真验证了分析的有效性,为偏心故障诊断提供了理论基础。为定量分析发电机静偏心故障的严重程度,文献[14]建议通过提取定子电流频谱中的特定成分振幅作为偏心故障特征进行诊断;文献[15]在开关磁阻电机电枢绕组中加入感应线圈监测磁链以实现静偏心故障的诊断;文献[16-17]则探讨了一种基于感应电压与差动电流检测的静偏心故障诊断方法,为此类故障诊断提供了新的途径。

现有文献主要研究了开关磁阻电机和永磁同步发电机在静态偏心故障时的电磁力和振动特性,但对于电励磁双凸极类发电机研究较少。因此,本研究为 DSEG 的静偏心故障建立了气隙长度的等效解析模型,并对其主要电磁特性进行了理论推导;随后利用有限元法建立二维模型,并通过仿真结果验证了理论推导的电磁信号分析结果;最终在 Workbench 中耦合电磁-模态-谐响应分析模块对发电机的径向振动信号进行有限元仿真。研究结果表明理论分析与仿真结果大体一致,为电励磁双凸极发电机静偏心故障的诊断提供了理论依据。

1 理论分析

DSEG 发电系统结构示意图如图 1 所示,无故障时,由单独的励磁源通入励磁绕组提供电流,电机内部将产生一定的磁场分布,磁通经定子、气隙以及转子组成闭合磁路。拖动电机带动转子系统做旋转运动切割磁路时,匝链各相绕组的主磁通随之改变,进而在电枢绕组产生感应电动势,随后通过三相不控整流桥输出直流电压。

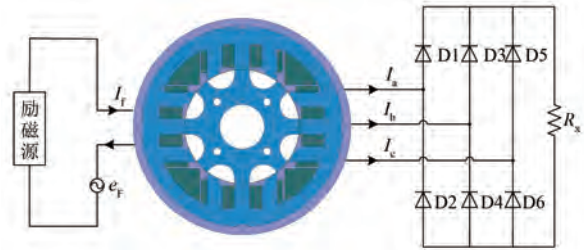


图 1 12/8 三相 DSEG 发电示意图
Fig. 1 Schematic diagram of 12/8 three-phase DSEG generation

1.1 静偏心故障

发电机正常运行下,转子与定子几何轴线对齐,且二者的旋转轴线相同。当出现转子定位不准确、轴承磨损、定子芯移动或轴偏转时,则会导致转子轴线与定子轴线存在一定的轴向偏移,引起转子与定子之间的气隙不均匀发生静偏心故障。静态偏心故障表现为转子几何轴线与定子几何轴线不重合,但与旋转轴线重合,如图 2(b) 所示。

图中: O_s 为定子几何中心; O_r 为转子几何中心; O_g 为几何旋转中心; e 为偏心位移量; δ_0 为正常单边气隙长度;偏心度 ε 则定义为 e/δ_0 。这种情况下整个圆周气隙磁场不再均匀分布,但最大气隙位置和最小气隙位置不随时间变化。

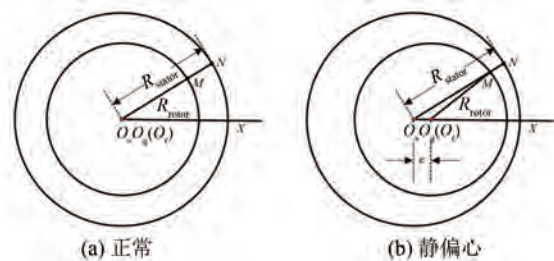


图 2 静偏心几何示意图
Fig. 2 Diagram of static eccentricity geometry

1.2 气隙磁密数学模型建立

假设忽略 DSEG 定子和转子铁心部分的磁动势降低以及涡流损耗等影响,根据安培环路定律,气隙磁密分布可以表示为磁动势与单位面积磁导相乘,具体公式如下:

$$B_r(\theta_m) = \mu_0 MMF(\theta_m) \kappa(\theta_m) \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; MMF (Magnetomotive Force) 为励磁磁动势; κ 为气隙磁导,可表示为 $1/g(\theta_m)$; θ_m 为机械角。

根据式(1)所得励磁磁动势-电机机械角曲线如图 3 所示。

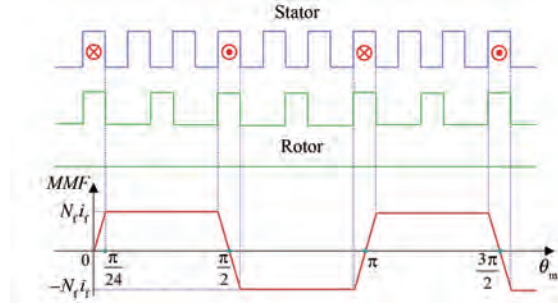


图 3 励磁绕组磁动势图

Fig. 3 Magnetomotive force diagram of the excitation winding

12/8 三相 DSEG 中每单元励磁绕组跨越 3 个定子极绕制,一个励磁源周期对应机械角为 π ,峰值为 $N_r i_r$ 。图 3 可以看出励磁线圈产生的磁动势分布在不同区间内被定义为分段函数 $MMF(\theta_m)$,其数学表达式为

$$MMF(\theta_m) = \begin{cases} \frac{24N_r i_r}{\pi} \theta_m, & \theta_m \in \left[0, \frac{\pi}{24}\right] \\ N_r i_r, & \theta_m \in \left[\frac{\pi}{24}, \frac{11\pi}{24}\right] \\ -\frac{24N_r i_r}{\pi} \left(\theta_m - \frac{\pi}{2}\right), & \theta_m \in \left[\frac{11\pi}{24}, \frac{13\pi}{24}\right] \\ -N_r i_r, & \theta_m \in \left[\frac{13\pi}{24}, \frac{23\pi}{24}\right] \\ \frac{24N_r i_r}{\pi} (\theta_m - \pi), & \theta_m \in \left[\frac{23\pi}{24}, \pi\right] \end{cases} \quad (2)$$

将 12/8 三相 DSEG 的边缘磁路长度近似为 $1/4$ 圆弧弧长^[9],其空气磁路可划分为 I、II、III 三个区域,如图 4 所示。考虑边缘效应后将上述区域合并,空气磁路长度可以近似表示为

$$g(\theta_m) = \delta_o + \delta_s + \delta_r \quad (3)$$

式中: δ_o 为重叠区气隙长度; δ_s 为定子槽边缘气隙长度; δ_r 为转子槽边缘气隙长度。

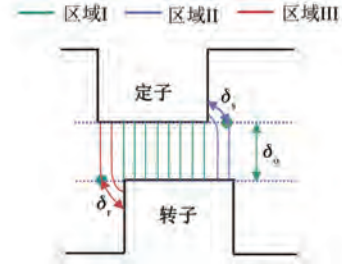


图 4 不同区域的空气磁路长度

Fig. 4 Length of air magnetic paths in different regions

其中 δ_s 可进一步细分为转子齿与邻近两个定子齿部边缘气隙长度的并联结果,其表达式如式(4)所示。同理,通过交换定转子齿的位置可推导出 δ_r ,如式 5 所示:

$$\delta_s = \begin{cases} \frac{\pi D}{4} \frac{\sin\left(\frac{\theta_m}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{24} - \frac{\theta_m}{2}\right)}{\sin \frac{\pi}{48} \cos\left(\frac{\theta_m}{2} - \frac{\pi}{48}\right)}, & \theta_m \in \left(0, \frac{\pi}{12}\right) \\ 0, & \theta_m \in \left(\frac{\pi}{12}, \frac{\pi}{6}\right) \end{cases} \quad (4)$$

$$\delta_r = \begin{cases} \frac{\pi D}{4} \frac{\sin\left(\frac{\theta_m}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{12} - \frac{\theta_m}{2}\right)}{\sin \frac{\pi}{24} \cos\left(\frac{\theta_m}{2} - \frac{\pi}{24}\right)}, & \theta_m \in \left(0, \frac{\pi}{6}\right) \\ 0, & \theta_m \in \left(\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (5)$$

1.3 静偏心下各电磁场信号分析

当 DSEG 发生静偏心后,转子系统的旋转轴线依旧与转子几何轴线对齐,因此电机各角度下的气隙长度不会随时间改变。据此特征可推导出静偏心下的气隙磁导为式(6),将结果进行幂级数展开,忽略高次谐波后可得静偏心下的 DSEG 气隙磁密表达式为^[18]

$$\kappa_{se}(\theta_m) = \frac{\mu_0}{g(\theta_m)(1 - \varepsilon \cos \theta_m)} = (1 + 0.5\varepsilon^2 + \varepsilon \cos \theta_m + 0.5\varepsilon^2 \cos 2\theta_m) \times \kappa_o \quad (6)$$

式中: κ_o 为健康状态下的定转子凸极之间的气隙磁导。三相电励磁双凸极发电机的电感矩阵 L 包括

电枢绕组与励磁绕组自感以及两者之间的互感, 绕组电感可等效为绕组匝数平方与气隙磁导相乘:

$$L = N^T N \cdot \kappa(\theta_m) \quad (7)$$

式中: N 为三相电枢绕组与励磁绕组匝数矩阵 $[N_m \ N_r]^T$ 。磁链被定义为电感与电流的乘积, 当 DSEG 带载运行发生静偏心故障, 产生的磁链主要包括电枢磁链与励磁磁链, 表达式如式(8)所示:

$$\psi = LI = \frac{N^T NI}{g(\theta_m)(1 - \varepsilon \cos \theta_m)} \quad (8)$$

式中: I 为由三相电枢绕组电流与励磁绕组电流组成的列向量。因此, 由发电机功率平衡可推导出功率方程:

$$P_i = I^T U = I^T R I + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} I^T L I \right) + \frac{1}{2} I^T \frac{dL}{dt} I \quad (9)$$

式中: P_i 为电机输入功率; R 为电枢绕组与励磁绕组内阻组成的对角阵。 P_i 表达式中第三部分为电磁功率 P_{em} :

$$P_{em} = -\frac{1}{2} I^T \frac{dL}{d\theta} I \omega_r \quad (10)$$

式中: ω_r 为机械角速度。忽略电枢绕组之间由互感作用的转矩项, 则静偏心后的电磁转矩可表示为

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} = -\frac{1}{2} \frac{N^T N I^T I \cdot \varepsilon \sin \theta_m}{g(\theta_m)(1 - \varepsilon \cos \theta_m)^2} \quad (11)$$

通过对以上特性的理论推导, 发现静偏心下偏心率将对发电机的磁链以及电磁转矩等特性造成重要影响, 且将式(6)代入式(8)、式(11)中可进一步推导出幂级数展开表达式, 为后续分析提供了理论基础。

1.4 静偏心下的振动分析

由于气隙磁密是电磁力和感应电动势的直接来源, 其不均匀分布会在发电机运行中产生周期性的电磁力波动, 最终导致电机的径向机械振动。根据式(6)可推导出静偏心故障下的气隙磁密数学模型为

$$B_r(\theta_m) = \mu_0 \kappa_0 [1 + 0.5\varepsilon^2 + \varepsilon \cos \theta_m + 0.5\varepsilon^2 \cos(2\theta_m)] MMF(\theta_m) \quad (12)$$

通过对比上式中不同机械角下的气隙磁密可知, 静偏心故障下气隙磁密的直流分量相较于正常运行状态下增加了 $0.5\varepsilon^2 \kappa_0$, 且偶数次谐波分量也随着静偏心程度的增加而逐渐提高。进一步对

定子系统进行受力分析, 由于铁磁材料磁导率较高, 无电流片的铁心表面上可以忽略切向气隙磁密的作用^[19], 因此定子中单位面积下所受的电磁力密度可表示为

$$f_r \approx \frac{B_r^2(\theta_m)}{2\mu_0} = [m_1 + m_2 \cos \theta_m + m_3 \cos(2\theta_m)] MMF^2(\theta_m) \quad (13)$$

式中各系数为

$$\begin{cases} m_1 = 1 + 1.5\varepsilon^2 + 0.25\varepsilon^4 \\ m_2 = 2\varepsilon + \varepsilon^3 \\ m_3 = 0.5\varepsilon^2 \end{cases} \quad (14)$$

由上式可知, 静偏心故障下 DSEG 定子中将激励出二倍频径向振动, 且随着偏心率的增大进一步加剧不平衡磁拉力, 最终导致定子总成中出现振幅逐渐增高的现象。

2 有限元仿真设置

DSEG 静偏心故障分析需对正常状态与故障状态建立各自的分析模型, 常见的发电机等效模型包括等效磁路法、解析法以及有限元分析法。其中有限元分析具有高精度、低成本等特点, 现被广泛应用于各类电机研究与验证。

本文以 12/8 三相 DSEG 为例进行研究, 有限元仿真采用 Ansys 软件中 Maxwell 2D 和 Workbench 进行建模与信号仿真, 仿真所建发电机的主要参数如表 1 所示。

表 1 12/8 三相电励磁双凸极发电机主要参数

Tab. 1 Main parameters of 12/8 three-phase DSEG

参数名称	参数值	参数名称	参数值
定子极数	12	铁心长度/mm	68
转子极数	8	气隙长度/mm	0.25
定子内径/mm	90	额定转速/(r·min ⁻¹)	2 000
转子外径/mm	89.5	电枢绕组匝数	10
极对数	8	励磁绕组匝数	100

2.1 电磁场仿真设置

DSEG 静偏心故障模拟借助于 Maxwell 2D 中 Eccentricity 插件实现, 本试验分别建立 0.025 mm、0.050 mm、0.075 mm、0.100 mm、0.125 mm、0.150 mm 以及 0.175 mm 等 7 种在 x 轴正方向上静偏心 10%~70% 的故障模型。仿真中设置发电机转速为 1 000 rpm, 仿真时间为 0.2 s, 采样率为 6.67 Ksps。

2.2 谐响应场仿真设置

本次试验利用电磁力-模态-谐响应多物理场耦合对 DSEG 的电磁振动特性进行仿真。首先基于 Ansys Workbench 平台建立健康与偏心故障状态下的 DSEG 定子与转子有限元 3D 模型;然后接入模态分析模块进行网格划分、边界划分以及固有频率的计算;最后耦合 Maxwell 2D 中定转子齿部电磁力分布进行谐响应分析。

其中定转子铁心材料设置为硅钢,机壳材料设置为铝合金,空隙处设置为真空;模态分析中定转子系统的网格划分设置为最大剖分长度,且为 10 mm,并对定转子齿部进行局部网格细化;定转子齿部的电磁力映射周期设置为 2 个电角度周期。

3 有限元仿真结果分析

3.1 气隙磁密验证

等效解析法与有限元仿真对比如图 5 所示,其中图 5(a)表示 DSEG 径向气隙磁密随机角周期变化趋势;图 5(b)则表示 DSEG 径向电磁力密度周期变化。在等效气隙法中,由于忽略铁心磁势的降低,得出的径向气隙磁密和电磁力密度均低于 Maxwell 有限元分析的结果。正向与负向磁通量应在一个周期内满足磁通量相等条件,因此当定转子接触面积减小时,气隙磁密则会增大,并在临界最小值时磁密值达到尖峰。

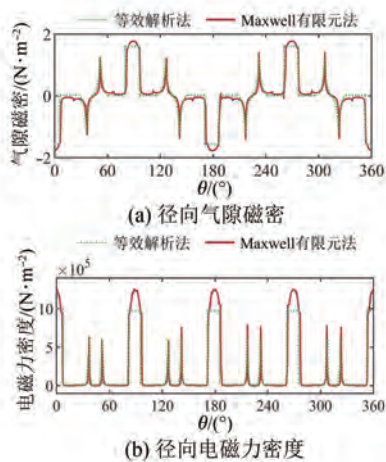


图 5 数学模型验证

Fig. 5 Mathematical model validation

对比图 5(a) 和图 5(b) 可以看出,在线性区域内,等效解析法的变化趋势与有限元分析法相

近,证明该方法具有一定的可行性。

3.2 电磁场分析

3.2.1 磁链特性分析

DSEG 的磁链特性对分析其静偏心故障至关重要。为准确评估不同程度静偏心故障对转子磁链的影响,本研究对磁链-时间特性进行了有限元分析。为研究转子系统静偏心程度对于 DSEG 磁链特性的影响,选取正常、静偏心 10%~70% 等 8 种状态下的磁链-时间有限元仿真结果进行分析。其中 A 相磁链-时间特性曲线如图 6 所示,可以看出静偏心对于磁链的影响与故障严重程度呈正相关,其中 70% 偏心时影响达到最大值。其主要原因是在低偏心程度下气隙磁密增加并不明显,但随着空气气隙长度减小,磁路磁导逐渐增大,导致相电流随之减小,最终磁链幅值降低。此外,当 DSEG 使用无位置传感器监测转子机械角时,磁链特性的改变将不利于转子系统定位,因此静偏心故障对于 DSEG 磁链具有一定程度的影响。

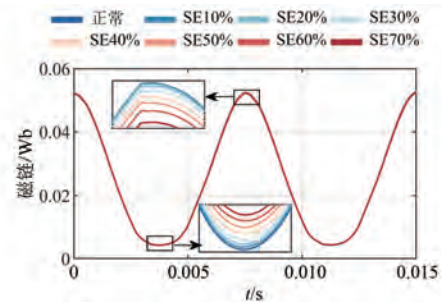


图 6 静偏心下的 A 相磁链

Fig. 6 A-phase magnetic flux linkage under static eccentricity

3.2.1 电磁转矩特性分析

转矩特性是评估发电机性能的关键指标,对于分析 DSEG 静偏心故障而言尤为重要。在高励磁电流下,DSEG 铁心可能磁饱和,气隙磁密的变化对转矩影响不大;但在低励磁条件下,电机在铁心磁场强度与气隙磁密的线性关系区域工作,气隙磁密变化会显著影响电磁转矩。因此,本试验专注于低励磁状态下的转矩-时间特性分析。试验中将 DSEG 的转速固定在 1 000 rpm,并在励磁绕组通入 3 A 电流,分析转子在 x 轴方向偏心 10% 至 70% 的电磁转矩时域特性,相应的特性曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出,波峰和波谷含

有高频谐波分量, 导致曲线出现一些毛刺。与正常状态相比, 静偏心故障导致电磁转矩的幅值在时域上显著增加, 并随故障程度加重而增加, 这一现象在仿真和理论推导中均得到验证。

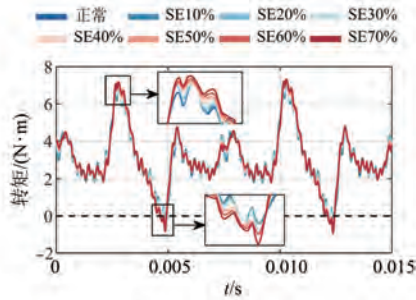
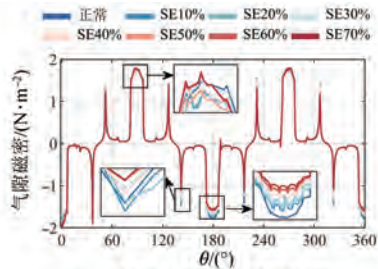


图 7 静偏心下的转矩特性

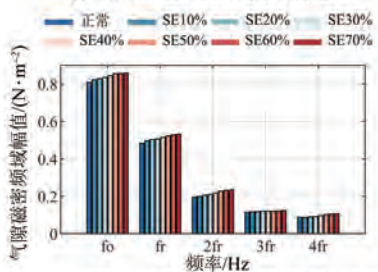
Fig. 7 Torque characteristics with static eccentricity

3.2.3 气隙磁密分析

DSEG 的气隙磁密-机械角特性曲线如图 8 (a) 所示。可以看出, 当 DSEG 在正常状态运行时, 气隙磁密分布均匀; 而电机存在静态偏心时, 定转子凸极间气隙分布不均匀, 使得凸极间气隙减小处的气隙磁阻降低, 气隙增大区域的气隙磁阻升高。气隙磁阻的不对称分布使得气隙增大区域的峰值降低, 气隙减小区域的峰值升高。随着静偏心故障程度的加剧, 气隙磁密曲线在时域上整体呈现出幅值向上偏移的趋势。



(a) 不同偏心程度下的气隙磁密



(b) 不同偏心程度下的气隙磁密频域幅值

图 8 静偏心下的气隙磁密特性

Fig. 8 Magnetic density characteristics of the air gap under static eccentricity

气隙磁密的主要谐波分量随偏心程度变化的情况如图 8(b) 所示, 可以看出, 直流分量和二次谐波分量均随静态偏心程度的升高而增加, 这与理论分析相吻合。

3.3 多物理场耦合仿真结果分析

静态偏心故障下的振动信号仿真需要通过 Workbench 进行电磁-模态-谐响应分析耦合仿真。在谐响应分析中, 将 Maxwell 2D 中定子内表面的电磁力密度负荷作为激励源, 映射到定子齿部表面, 以模拟转子对定子总成的影响, 并通过模态叠加法估计 DSEG 的振动频谱。在静态偏心故障时, 定子齿部的电磁力受力不均匀, 导致径向变形运动, 从而引发发电机的电磁振动。

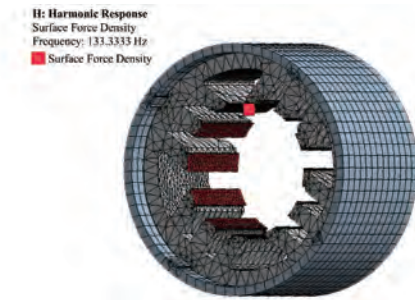


图 9 定子齿电磁力载荷载入

Fig. 9 Electromagnetic force loading of stator teeth

首先, 在 Workbench 中导入 Maxwell 的同等平面比例模型, 建立 DSEG 的定子总成等效三维模型。然后, 在谐响应分析模块中, 以不同频率的正弦形式将电磁力密度负荷作用在发电机定子齿的中心。图 9 为电磁力密度载荷在 133.3 Hz 下, DSEG 定子铁心齿部磁场径向力的载荷分布。

最终完成多物理场耦合仿真后即可得到不同状态下的振动加速度频谱图。由于实际发电机静态偏心故障下不会出现超过 50% 的偏心度, 故本试验选取了正常、静偏心 30% 以及静偏心 50% 三种工况进行仿真研究。DSEG 通入 17.94 V 的电压, 在三种工况下以 1 000 rpm 空载运行时, 其定子总成在 x 轴方向上的振动加速度信号频谱图如图 10 所示。仿真结果显示, 当电机正常运行时, 电磁力密度导致的振动主要由一倍频分量构成, 而高次谐波分量如二倍、三倍等较少。而静偏心故障时由于不平衡磁拉力增大, 引起二倍频分量激增, 其中静偏心 30% 时一倍频分量为 $6\,273.6\text{ mm/s}^2$, 二倍频分量为 $6\,979.2\text{ mm/s}^2$, 与正常状态相比分别

增加 6.7% 和 266.1%。随着偏心程度的增大,静偏心 50% 时一倍频分量为 $7\,959.8\text{ mm/s}^2$,二倍频分量为 $12\,817.1\text{ mm/s}^2$,相较于静偏心 30% 时分别提高 26.9% 和 83.7%,与本文理论分析的二倍频增加结果以及文献[20]中实际试验结果相符。

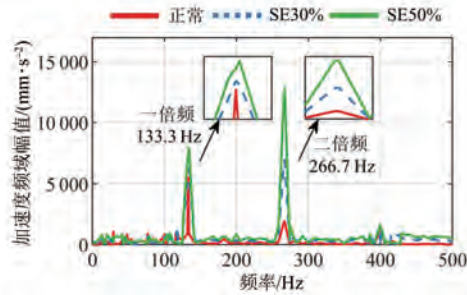


图 10 不同偏心程度下的振动频谱

Fig. 10 Vibration spectra at different degrees of eccentricity

为进一步验证本仿真对于 DSEG 正常和静偏心故障下的振动信号仿真具有普适性,选取相同励磁源、2 000 rpm 和 3 000 rpm 空载运行时正常、静偏心 30% 以及静偏心 50% 三种状态下 DSEG 定子总成在 x 轴方向上的振动加速度信号频谱图。

同静偏心程度下 2 000 rpm 和 3 000 rpm 两种工况的频谱图如图 11 和图 12 所示。可以看出,在振动仿真信号中频率成分依旧符合理论推导结果,且静偏心下振动信号频谱中二倍频幅值随着偏心程度增加而增大。其中,2 000 rpm、静偏心 30% DSEG 机壳表面的一倍频和二倍频振动信号分别增加 4.2% 和 236.1%;静偏心 50% 的一倍频与二倍频振动信号相较于静偏心 30% 分别增加 27.5% 与 83.4%。3 000 rpm 静偏心故障对于两种频率成分的幅值影响则更加明显,静偏心 30% 的一倍频与二倍频振动信号分别增加 15.3% 与 249.6%;静偏心 50% 时一倍频与二倍频振动信号则进一步增加 44.5% 与 51.6%。

综上三种工况的仿真结果证明了本研究中 DSEG 的电磁力-模态-谐响应分析仿真模型对于振动信号的响应具有一定的可行性,振动信号可作为发电机静态偏心故障诊断的特征信号,为后续实际静态偏心故障诊断试验提供了理论基础。

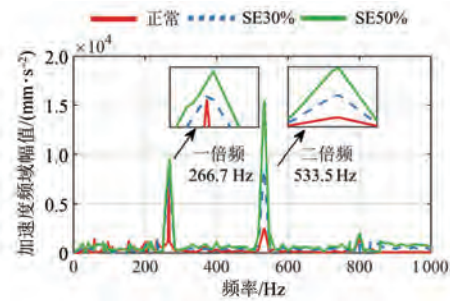


图 11 2 000 rpm 下不同偏心程度下的振动频谱

Fig. 11 Vibration spectra at 2 000 rpm with different degrees of eccentricity

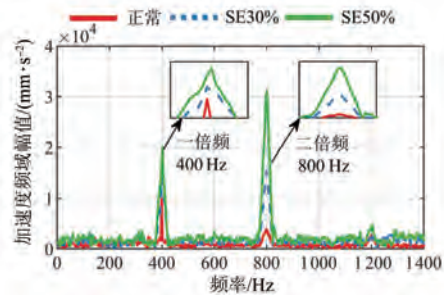


图 12 3 000 rpm 下不同偏心程度下的振动频谱

Fig. 12 Vibration spectra at 3 000 rpm with different degrees of eccentricity

4 结语

根据等效解析法构建了一种 12/8 三相 DSEG 的气隙磁密数学模型,并通过 Maxwell 2D 有限元仿真进行验证。试验结果显示,在线性区内本模型推导的气隙磁密与电磁力密度基本吻合仿真结果。

理论上在静偏心状态下对 DSEG 的气隙磁密、电磁转矩和磁链等特性之间的关系进行推导分析,并根据有限元仿真结果对以上推导进行验证,进一步量化静偏心故障对 DSEG 的影响。

利用 Workbench 平台实现 DSEG 的电磁力-模态-谐响应多物理场耦合仿真,分析了静偏心前后的振动信号频谱图,观察到的二倍频增强现象证实了理论分析是可行的,为后续静偏心故障诊断提供了理论依据。

参考文献

- [1] 张卓然,于立,李进才,等.飞机电气化背景下的先进航空电机系统[J].南京航空航天大学学报,2017,49(5):622-634.

- ZHANG Z R, YU L, LI J C, et al. Key technologies of advanced aircraft electrical machine systems for aviation electrification [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2017, 49(5): 622-634
- [2] 陈文杰, 崔江. 基于 LSTM 的航空发电机整流电路诊断技术[J]. *电机与控制应用*, 2023, 50(4): 85-90.
- CHEN W J, CUI J. Diagnosis technology of aero-generator rectifier circuit based on LSTM [J]. *Electrical Machines & Control Application*, 2023, 50(4): 85-90.
- [3] 杨占刚, 徐海义, 成博源, 等. 基于 FWA-DBN 的航空发电机偏心故障诊断[J]. *系统工程与电子技术*, 2022, 44(5): 1757-1764.
- YANG Z G, XU H Y, CHENG B Y, et al. Aviation generator eccentricity fault diagnosis based on FWA-DBN [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2022, 44(5): 1757-1764.
- [4] 张京军, 邬占川, 张海军, 等. 静态偏心故障对开关磁阻电机电磁特性的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(10): 3347-3353.
- ZHANG J J, WU Z C, ZHANG H J, et al. Influence of static eccentricity fault on electromagnetic characteristics of switched reluctance motor [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2016, 47(10): 3347-3353.
- [5] 李全峰, 黄厚佳, 黄苏融, 等. 表贴式永磁电机转子偏心故障快速诊断研究[J]. *电机与控制学报*, 2019, 23(12): 48-58+67.
- LI Q F, HUANG H J, HUANG S R, et al. Research on fast diagnosis of rotor eccentricity fault for surface-mounted permanent magnet motor [J]. *Electrical Machines and Control*, 2019, 23(12): 48-58+67.
- [6] ALIMARDANI R, RAHIDEH A, KIA S H. Mixed eccentricity fault detection for induction motors based on time synchronous averaging of vibration signals [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(3): 3173-3181.
- [7] LI Y X, LU Q F, 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): 1-10.
- [8] LI Y X, LU Q F, 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): 1095-1104.
- [9] GAUSSENS B, HOANG E, DE LA BARRIERE O, et al. Analytical approach for air-gap modeling of field-excited flux-switching machine: No-load operation [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, 48(9): 2505-2517.
- [10] 任杰, 王秀和, 赵文良, 等. 永磁同步电机转子偏心空载气隙磁场解析计算[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(8): 26-32.
- REN J, WANG X H, ZHAO W L, et al. Open circuit magnetic field prediction in permanent magnet synchronous machine with rotor eccentricity [J]. *Electrical Machines and Control*, 2020, 24(8): 26-32.
- [11] 何玉灵, 王发林, 唐贵基, 等. 发电机气隙静态偏心对电磁转矩的影响[J]. *振动、测试与诊断*, 2017, 37(5): 922-927+1063.
- HE Y L, WANG F L, TANG G J, et al. Effect of static eccentricity of generator air gap on electromagnetic torque [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2017, 37(5): 922-927+1063.
- [12] 何玉灵, 张文浩, 孙凯, 等. 气隙偏心对同步发电机定子绕组温升特性的影响[J/OL]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2024-3-13. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//13.1212.tm.20221228.1726.001>.
- HE Y L, ZHANG W H, SUN K, et al. Impact of air gap eccentricity on stator windings temperature in synchronous generators [J/OL]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2024-3-13. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//13.1212.tm.20221228.1726.001>.
- [13] 张存, 沈意平, 阳雪兵, 等. 气隙偏心下永磁风力发电机定子电磁振动特性分析[J]. *电机与控制应用*, 2022, 49(4): 53-59.
- ZHANG C, SHEN Y P, YANG X B, et al. Electromagnetic vibration characteristics analysis of permanent magnet wind generator under air gap eccentricity [J]. *Electrical Machines & Control Application*, 2022, 49(4): 53-59.
- [14] EBRAHIMI B M, FAIZ J, ROSHTKHARI M J. Static-, dynamic-, and mixed-eccentricity fault diagnoses in permanent-magnet synchronous motors [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*,

- 2009, 56(11): 4727-4739.
- [15] MORADI R, HAJIHOSEINLU A. A novel method for diagnosis and analysis of rotor faults in switched reluctance motor [C] // Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference, Tehran, 2014.
- [16] TORKAMAN H, AFJEI E. Sensorless method for eccentricity fault monitoring and diagnosis in switched reluctance machines based on stator voltage signature [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49 (2): 912-920.
- [17] TORKAMAN H, AFJEI E. Comprehensive detection of eccentricity fault in switched reluctance machines using high-frequency pulse injection [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28 (3): 1382-1390.
- [18] 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): 2034-2043.
- XIE Y, LIU H D, LI F, et al. Effect of rotor eccentricity and stator short circuit faults on magnetic field and electromagnetic vibration characteristics of synchronous generator [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48 (8): 2034-2043.
- [19] 于立. 多电发动机高速双凸极起动发电机系统关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- YU L. Research on key technology of high-speed double convex pole starter generator system for multi-electric engine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [20] 万书亭, 李和明, 李永刚. 气隙偏心对汽轮发电机定转子振动特性的影响[J]. 振动与冲击, 2005 (6): 21-23.
- WAN S T, LI H M, LI Y G. Analysis on vibration characteristics of generator with the fault of eccentric air-gap [J]. Journal of Vibration and Shock, 2005 (6): 21-23.
-
- 收稿日期:2023-11-18
收到修改稿日期:2024-01-26
作者简介:
周 凡(1999-),男,硕士研究生,研究方向为航空发电机故障诊断与检测,fanzhou@nuaa.edu.cn;
* 通信作者:崔江(1977-),男,博士,副教授,研究方向为航空发电机故障诊断与检测,cuijiang@nuaa.edu.cn。

Eccentricity Characteristics of Doubly Salient Electromagnetic Generator

ZHOU Fan, CUI Jiang^{*}, YANG Jing

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 211106, China)

Key words: doubly salient electromagnetic generator; static eccentricity fault; finite element analysis

The doubly salient electromagnetic generator (DSEG) is characterized by its simple structure and high controllability, making it suitable for using in extreme working environments such as aerospace. Although DSEG is calibrated for shaft alignment before leaving the factory, eccentric faults may still occur under special conditions. Eccentric faults, being one of the more common types of mechanical failures in generators, are not readily apparent in the early stages of failure through electrical signal phenomena, making rapid fault detection challenging. Extreme environments increase the susceptibility of signals to interference, thereby complicating the determination of motor status using traditional fault detection methods. When the generator experiences an eccentric fault, the resulting uneven air-gap magnetic density and asymmetry in the magnetic circuit cause unbalanced magnetic pull forces, which exacerbate stator and rotor vibrations, reduce the lifespan of the generator, and may even lead to catastrophic events such as stator winding fires. Therefore, studying the characteristics of DSEG when a static eccentric fault occurs is crucial for ensuring its safe and stable operation.

Addressing the static eccentric fault of DSEG, firstly, an equivalent analytical model for the generator's air-gap length is established and theoretical relationships between the degree of static eccentricity and key characteristics such as flux linkage, electromagnetic torque and air-gap magnetic density are derived. Secondly, a 2D finite element model of a 12/8 three-phase DSEG is constructed using Ansys's Maxwell finite element simulation

software to validate the theoretical analysis of electromagnetic signals. The theoretical derivation of air-gap magnetic density is compared with the finite element analysis results, as shown in Fig. 1. And finally, the radial vibration signals of the generator are simulated using the coupled electromagnetic, modal, and harmonic response analysis modules in Workbench.

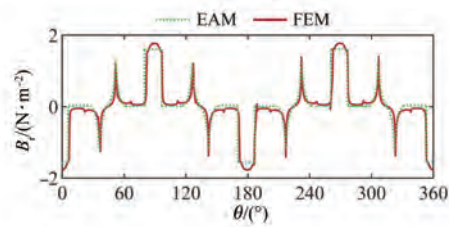


Fig. 1 Validation of the equivalent analytical model of radial air-gap magnetic density

The simulation results reveal that under normal operation, the vibration caused by electromagnetic force density mainly consists of the fundamental frequency component, with higher harmonic components such as the second and third harmonics being relatively small. In contrast, during a static eccentric fault, the unbalanced magnetic pull force increases, leading to a surge in the second harmonic frequency component, which corresponds with the theoretical analysis of the increase in the second harmonic frequency presented in this paper. The research findings indicate that the simulation results are in general agreement with the theoretical analysis, demonstrating that the eccentricity rate in static eccentric faults has a significant impact on the performance of the DSEG, and provide a theoretical basis for static eccentricity fault diagnosis.