

文章编号:1006-1355(2022)06-0012-07+44

偏心故障下可偏转双定子开关磁阻电机的电磁振动特性分析

李 争, 刘力博, 魏晓鹏, 王雪婷, 邢璇璇, 孙鹤旭

(河北科技大学 电气工程学院, 石家庄 050018)

摘 要:对一种带转子偏心故障的可偏转双定子开关磁阻电机进行振动和声学特性研究。考虑到声学振动涉及到电磁场、机械场和声场,首先建立偏心状态下的数学模型,对气隙间距、磁路磁链和磁路特征进行分析,其次利用有限元软件建立偏心故障下电机三维有限元模型。并对偏心故障状态和无偏心故障状态进行比较,得到电机有无偏心状态下的电磁分布和磁链-角度特性,将不均匀的电磁力导入谐波响应模块中,对定子铁芯振动进行分析。最后,对有无偏心状态下的声场进行分析。结果表明,偏心状态下电磁径向力出现畸变,相较于无偏心状态,振动和噪声幅值增加,出现噪声分布不均匀现象。对电机转子偏心故障的研究可为电机未来的故障诊断和特性优化提供参考。

关键词:振动与波;开关磁阻电机;双定子;有限元分析;转子偏心;电磁噪声

中图分类号:TM301

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2022.06.003

Analysis of Electromagnetic Vibration Characteristics of a Deflectable Double-stator Switched Reluctance Motor with Eccentric Fault

LI Zheng, LIU Libo, WEI Xiaopeng, WANG Xueting,
XING Xuanxuan, SUN Hexu

(School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology,
Shijiazhuang 050018, China)

Abstract : The vibration and acoustic characteristics of a deflectable double stator switched reluctance motor with eccentricity fault are studied. Considering the relation of the acoustic vibration to electromagnetic field, mechanical field and sound field, the mathematical model of the motor under eccentric condition is established. The air gap spacing, magnetic circuit flux linkage and magnetic circuit are deduced. Then, the three-dimensional finite element model of the motor is established by means of finite element software. The electromagnetic distribution and flux linkage angle characteristics of the motor with or without eccentricity are obtained and compared. Introducing the uneven electromagnetic force into the harmonic response module, the stator core vibration is analyzed. Finally, the sound field with or without eccentricity is analyzed. The results show that the electromagnetic radial force is distorted in the eccentric fault state, the amplitudes of vibration and noise increase in comparison with the non-eccentric state, and the noise distribution is uneven. The research on the eccentric fault of motor rotor provides a reference for the fault identification and optimization of motor features in the future.

Key words : vibration and wave; switched reluctance motor; double stator; finite element analysis; rotor eccentricity; electromagnetic noise

收稿日期:2021-09-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877070,U20A20198,51577048);河北省重点研发计划资助项目(19214501D,20314501D);河北省自然科学基金资助项目(E2021208008);河北省高层次人才资助项目(A201905008)

作者简介:李争(1980-),男,石家庄市人,教授,专业方向为特种电机及其控制技术。

E-mail: Lzhfgd@163.com

21世纪以来,生态环境成为当今世界上的需要改善的重要问题。为了减小环境负荷,人们需要一种新型高效、低能耗、零污染的绿色交通工具,因此电动汽车成为解决能源问题和环境问题的可行方案。目前永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous motor,PMSM)是电动汽车最受欢迎动力驱动电机,原因是PMSM具有转矩大、功率密度高和控制方案成熟等优点^[1]。但是

PMSM 广泛应用受到稀土材料的成本较高的阻碍。开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, SRM)在现代工业上有着广泛应用,它具有特殊的性能优势,具有可靠性好、低成本、高效率、高转速功率比和转矩脉动高等特点^[2],其良好的机械特性可以降低系统的功率损耗,提高电机运行效率。因其各方面优越的性能,在航空航天、电动汽车、家用电器领域被广泛应用^[3-5]。

SRM 是一种较为复杂的机电耦合系统,其固有的双凸极结构和连续通断的电源供电形式导致其工作期间电机状况复杂,还会伴随由于材料分布不均、加工精度、安装不一致以及在运行过程中的不确定因素所导致转子偏心问题。SRM 将产生不均匀的磁拉力,会导致转子齿和定子齿间的径向力互相作用,产生的径向力会引起电磁噪声。并且当电机不平衡的磁拉力的频率在定子基座部件的固有频率附近时,引发 SRM 电机的部件共振产生噪声。SRM 转子偏心对电机正常运行的影响逐渐被重视,相应产生的定转子之间的振动特性研究显得尤为重要,对于传统开关磁阻电机的振动研究已经较为成熟^[6-8]。

随着工业化进程的发展,在一定空间内双定子结构的 SRM 机械集成度较高,减少了机械系统的重量和体积,而且双定子结构的电机在输出特性上优于单定子结构的电机^[9]。文献[10]中提出的双定子开关磁阻电机具有高效的动力转换配置,具有独特的磁路设计和机械结构。文献[11]中在传统的单定子开关磁阻电机的基础上,设计了一种新型的平板式双定子分段杯型转子结构,转子结构中的节段保持架只需使用单轴承就可以直接连接到负载上,无需使用连接轴,可以有效减小径向力分量,提高电机运动力。文献[12]中提出了一种双定子开关磁阻电机,采用改进的磁配置,减少机器中的径向力,并对这种电机进行了振动分析。

文献[13-14]中提出的内外双定子开关磁阻发电机可以有效提高电机发电效率,但并未考虑到电机可能发生的故障问题。本文针对可偏转双定子开关磁阻电机(Deflecting Double Stator Switched Reluctance Motor, DDSRM)存在的偏心故障问题,建立了该电机在偏心状态下的数学模型,分析偏心故障对电机电磁特性的影响。利用 Maxwell 有限元分析建立电机的偏心故障模型,对其偏心故障进行仿真分析,获得不同偏心率磁链影响程度曲线,并利用 ANSYS 进行振动-声场分析,对偏心时产生的振动噪声进行仿真对比。

1 DDSRM 转子偏心模型

在电机加工制造和装配过程中会出现转子偏心现象,转子偏心状态分为动态偏心和静态偏心。引起动态偏心故障的原因是电机轴承长时间磨损和运行时产生的振动造成的。动态偏心状态下电机气隙间距会动态变化,随着转子绕定子轴线偏转,最大气隙间距也会同时变化。静态偏心是由定转子安装位置不正确造成的,特点是转子轴偏离电机主轴,但是仍然围绕转子轴旋转。由于转子旋转轴仍为转子轴线,电机气隙各位置间距不随转子运动发生变化。转子偏心状态必然会影响气隙距离的大小,使转子偏心状态的气隙磁场发生畸变,并且限制电机速度,影响电机的转矩波动和振动情况。

图 1 为可偏转双定子磁阻发电机原理图,图 1(a)为电机的整体图,整体由电机外壳,定转子、转轴和底座构成。图 1(b)为电机纵向解剖分布图,可以看出整个发电机包括外定子和转子构成的内发电系统和外定子和转子构成的外发电系统。DDSRM 区别于普通发电机结构的部分是拥有内外双定子,通过双定子结构可以实现电机的偏转运行,当发电机的驱动力发生变化时,DDSRM 依旧可以持续高效发电。由于 DDSRM 的双定子所组成内外发电双系统会导致磁路互相影响,通过在发电机转子中间增加性能优异的隔磁板,防止转子内外部分的磁场干扰。发电机的转子与输出转轴通过固定板作为媒介连接,转轴可以实现电机偏转运动,保证电机偏转运动稳定运行。轴承通过转轴连接转子内部,可实现在电机偏转的同时减小电机的摩擦带来的机械损耗,提升发电机的效率,是发电机不可缺少的一部分。

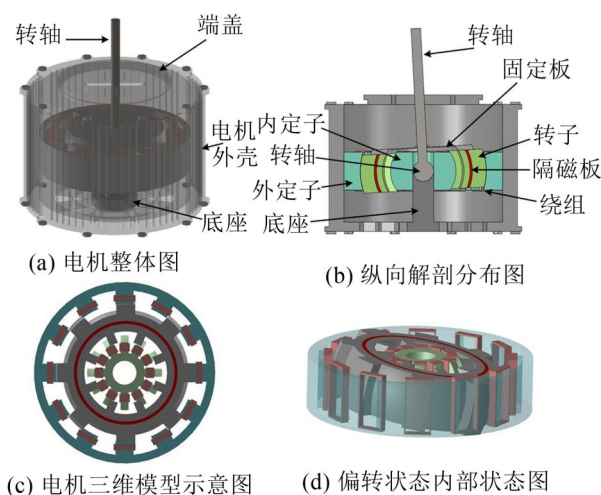


图 1 DDSRM 原理图

DDSRM 内外定子的齿数均为 12,定子齿极形状为凹形球面,内外转子齿极数均为 8,发电转子的齿极形状均为凸性球面,设计球面结构是为了实现

偏转运动的可行性。图1(c)为电机三维模型示意图,展示了转子内外齿相差 45° ,同时展示了线圈绕组方式为集中绕组分布。在图1(d)为电机偏转状态的内部状态图,展现了发电机转子在偏转状态下依旧可以进行旋转。

DDSRM的绕组通过与外部电路相连,在发电状态可以实现机械能和电能之间的能量转换,内外发电系统的绕组分别连接一个独立的外电路,通过控制电机的偏转状态来提高发电效率。DDSRM的具体机械参数见表1。

表1 DDSRM的机械参数

参数	数值
外定子外径	300 mm
内定子内径	13.5 mm
转子外径	108 mm
转子内径	43.3 mm
气隙间隔	2 mm
转子极数	12
定子极数	8
转子偏转角度	$0 \sim 17^\circ$
隔磁板厚度	15 mm
额定转速	200 r/min
额定功率	2.5 kW
额定转矩	70 N·m
额定电压	380 V

2 DDSRM转子偏心数学模型的建立

当开关磁阻电机发生静态偏心时,转子旋转的轴线仍然是转子轴心,所以电机各处的气隙间距不会随转子旋转发生变化。开关磁阻电机的偏心示意图见图2。根据静态偏心的特点,气隙间距可以用转子位置偏转角 θ 和偏心方向角 β 相关的函数表示。

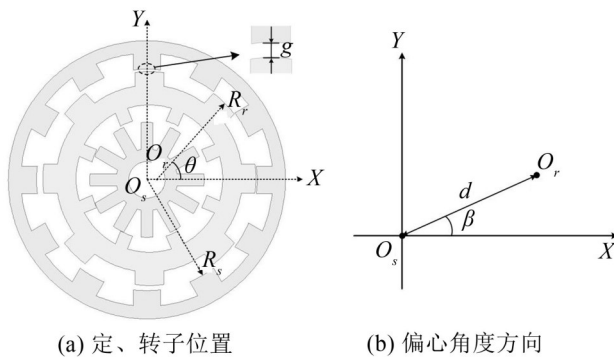


图2 DDSRM偏心示意图

图2(a)中所示,以电机转子模型中心以 O_r 作为参考坐标系原点,以 X 正方向作为起始线,经过转子位置偏转角 θ 后,DDSRM静态偏心状态下的气隙间距 g_1 为:

$$g_1 = \sqrt{R^2 - d^2 \sin^2(\theta - \beta)} - r - d \cos(\theta - \beta) \quad (1)$$

式中: R, r 为双定子开关磁阻电机定子内径和转子外径, d 为定子和转子偏心距离。由于电机转子和定子之间的气隙距离远远小于转子外径,则偏心状态下的气隙间距表达式可以简化为:

$$g_1 = R - r - d \cos(\theta - \beta) = g_0 - d \cos(\theta - \beta) \quad (2)$$

式中: g_0 为无偏心状态下定转子的气隙间距。 d 为转子相对于 O_s 偏心位移,则磁阻电机的偏心率 γ 为:

$$\gamma = \frac{d}{g_0} \quad (3)$$

根据对静态偏心状态下的气隙磁导间距的推导,气隙磁导也可以由转子位置偏转角、偏心方向角和偏心率相关函数表示,气隙磁导可以表示为:

$$\rho_{\text{airgap}}(\theta - \beta) \approx \frac{1}{g_1(\theta - \beta)} = \frac{1}{g_0 - d \cos(\theta - \beta)} = \frac{1}{g_0[1 - \gamma \cos(\theta - \beta)]} \quad (4)$$

将式(4)利用傅里叶级数公式展开,则静态偏心状态下的气隙磁导 ρ_{airgap} 的傅里叶级数展开式为:

$$\rho_{\text{airgap}}(\theta, \beta) = \frac{1}{g_0} \sum_{n=0}^{\infty} \gamma^n \cos^n(\theta - \beta) = \frac{1}{g_0} \sum_{n=0}^{\infty} \rho_n \cos[n(\theta - \beta)] \quad (5)$$

式中: γ 为相对偏心率,气隙磁导率的傅里叶系数 ρ_n 为:

$$\rho_n = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{1-\gamma^2}} & n=0 \\ \frac{2(1-\sqrt{1-\gamma^2})^n}{\gamma^n \sqrt{1-\gamma^2}} & n \geq 1 \end{cases} \quad (6)$$

对开关磁阻电机的磁路进行简化后,磁路的总磁阻 R 表示如下:

$$R = R_s + R_r + R_{\text{airgap}} \quad (7)$$

式中: R_s 为定子铁芯磁阻, R_r 为转子铁芯磁阻, R_{airgap} 为气隙磁阻。

由于线性磁路中的电机的铁芯磁阻远远小于气隙磁阻,为方便计算铁芯磁阻忽略不计。因此电机磁路中的磁导 λ 表达式可以表示为:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_{\text{core}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{airgap}}} \approx \frac{1}{\lambda_{\text{airgap}}} \quad (8)$$

式中: λ_{core} 为电机铁芯磁导总和, λ_{airgap} 为气隙磁导。

根据开关磁阻电机的线性模型可知,相绕组电感正比于磁路的磁导。将电机气隙磁导表达式(5)代入上述关系,可以到电感 L 与转子位置偏转角和偏心率的关系如下:

$$L = N^2 \lambda = \frac{N^2}{g_0 [1 - \gamma \cos(\theta - \beta)]} \quad (9)$$

根据开关磁阻电机的基本原理,激励相磁链可以用激励相电流和电机电感的乘积表示,因此电机 k 相绕组的磁链可以表示为:

$$\psi_k = LI = \frac{N^2 I}{g_0 [1 - \gamma \cos(\theta - \beta)]} \quad (10)$$

对于开关磁阻电机的电流回路的磁场系统,磁场储能 W_m 的表达式为:

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n I_k \psi_k \quad (11)$$

式中: I_k 为 k 相激励相电流, ψ_k 为 k 相回路磁链。

在线性模型下,单项绕组下的磁阻转矩可以表示为:

$$T = \frac{\partial W_m}{\partial \theta} = \frac{1}{2} I^2 \frac{\partial L}{\partial \theta} = -\frac{1}{2} \frac{N^2 I^2 \gamma \sin(\theta - \beta)}{g_0 [1 - \gamma \cos(\theta - \beta)]^2} \quad (12)$$

式中: W_m 为电机单项绕组的磁动能, L 为电机电感, N 为绕组匝数。

通过对开关磁阻电机静态偏心状态下的气隙间距、气隙磁导、磁路磁链和转矩特性进行推导,可以得到静态偏心故障状态下,DDSRM的电磁特性和转子偏转角 θ 、偏心角 β 相关。

利用Maxwell张力法求解电磁力时,计算结果的准确性与有限元网格划分精度有关,是一种对求解域剖分精度要求较高的一种方法。相较于Maxwell张量法,虚功位移法求解电机整个磁场的磁储能的倒数。由于DDSRM网格剖分精度不够可能会导致错误,本文采用对气隙网格要求不高的虚功位移法求解电磁力。

根据虚功位移公式,DDSRM径向力可描述为:

$$F_r = \frac{dW_m}{dg} = -\frac{\mu_0 I^2 N^2 l_k r \varphi_{ov}}{2g_1^2} \quad (13)$$

式中: μ_0 为真空下磁导率; l_k 为定子叠片长度; r 为定子内径, φ_{ov} 为定转子重叠角。

当定转子之间的气隙间距越大时,径向力越小。当定子绕组导入电流时径向力逐渐上升,直到激励绕组换向时,径向力达到最大值后突然下降,从而导致径向力波形呈现脉冲形式。从振动和声学方面分析,径向力波波动越大,冲击力度越大,噪声和振动越剧烈。

3 转子偏心下的电磁特性分析

在开关磁阻电机发生转子偏心故障时,偏心状态下较小气隙间距处的气隙磁阻减小,较大气隙间距处的气隙磁阻增加。这种现象导致开关磁阻电机

的磁场发生畸变,会影响电机磁通分布和磁链特性。由于DDSRM结构的特殊性,在发生转子偏心故障时,分析两个定转子回路会更加复杂。

由于需要建立DDSRM的气隙偏心故障模型,本章利用有限元软件MAXWELL二维瞬态磁场进行分析,建立一台12/8/12极的可偏转双定子开关磁阻电机不同偏心状态下的参数化模型。DDSRM有限元模型中定子和转子铁芯采用无取向的硅钢片材料DW540-50,对定子相绕组采用外电路激励。在实际的生产安装精度限制下,考虑到开关磁阻电机普遍会出现定、转子凸级之间的摩擦,因此对于DDSRM相对偏心率只考虑其在10%~60%的情况。

图3(a)所示为无偏心故障状态下DDSRM内部磁力线分布,由于没有发生偏心故障现象,定、转子凸级的气隙间距分布均匀,形成4个相同的磁通回路。图3(b)所示为静态偏心状态下转子沿偏心方向角 $\beta=90^\circ$ 垂直方向正向偏心50%时DDSRM内部的磁力线分布。通过磁力线分布可得,电机外转子上下部分的磁力线分布存在明显不对称的现象,电机上部分明显比无偏心状态下的峰值磁通增加了13%。DDSRM偏心状态下磁力线分布不均匀现象的原因是转子沿垂直方向偏心,使顶部定、转子的气隙间距变小,气隙磁阻变小,使得上半部分磁路总磁阻变小,因此上半部分磁力线数量更加密集。图3(c)所示为静态偏心状态下转子沿偏心方向角 $\beta=0^\circ$ 水平方向正向偏心50%时DDSRM内部的磁力线分布。通过磁力线分布可得,电机外转子左右部分的磁力线分布存在明显不对称的现象。原因和图3(b)相似。通过观察不同偏心状态下DDSRM磁力线分布,可以看出偏心对定转子之间的磁场有着显著影响。

图4(a)为DDSRM偏心状态和不偏心状态下气隙处磁密径向分量的分布情况。图4(b)为根据有限元计算得到偏心状态下的电磁径向力时空分布图。遵循最小磁阻原理,当定、转子齿极重合时,磁路中磁阻最小,磁密幅值最大。通过电机结构可知,任何时刻一个圆周内径向磁密均会出现4个峰值,与磁力线分布图对应。通过观察,偏心状态下DDSRM模型的径向分量出现增大情况,幅值平均增加了6.07%。根据电磁径向力波表达式可知,偏心故障增加径向磁密的大小,径向力均会出现明显变化。

图5(a)表示静态偏心时不同偏心方向角 β 的磁链-角度特性,根据DDSRM的8极转子数的特点,在偏心率 $\gamma=50\%$ 情况下,选取了偏心角度为 $15^\circ \sim 45^\circ$ 进行计算。由于磁链强度和定、转子的气隙间距成

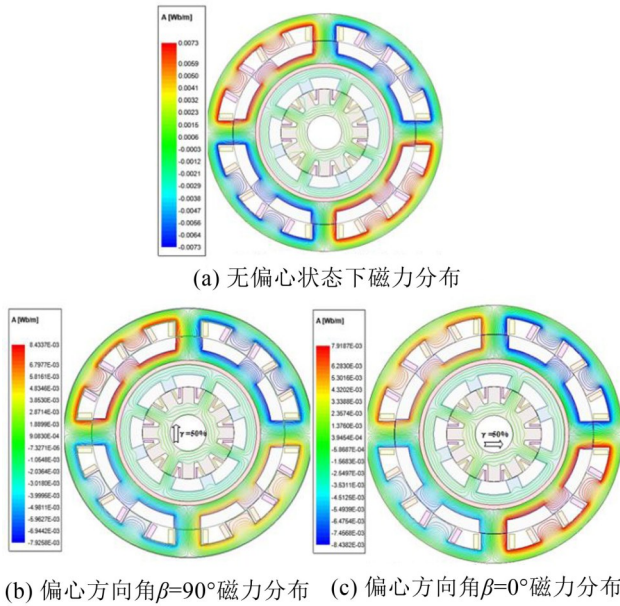


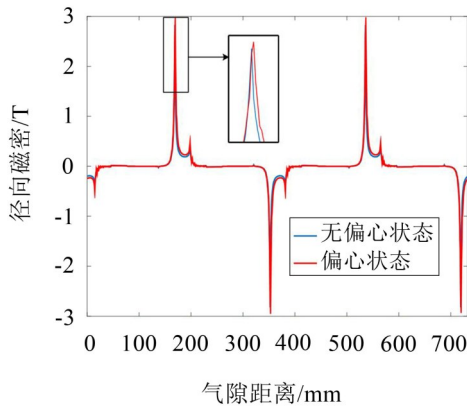
图3 无偏心与偏心状态DDSRM磁力线分布对比图

反比,随着转子偏心方向角 β 的增大,DDSRM的磁链波形大致相同,幅值逐渐增加。其中偏心方向角 $\beta=0^\circ$ 时,磁链数值和波形基本和无偏心状态下一致;偏心方向角 $\beta=45^\circ$ 时,磁链的幅值处于最大值。磁链特性出现这种现象的主要原因为此时只有4个定子齿有激励,由于转子偏心距离远远小于定、转子齿

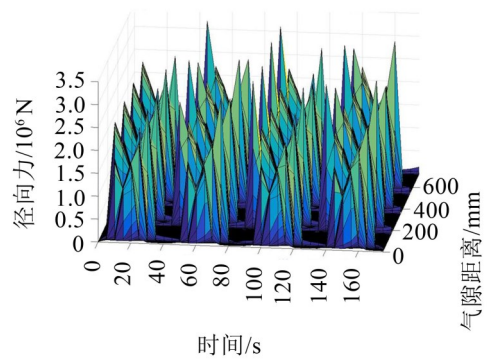
宽,偏心方向角较小时其对转定、转子重叠区域不会产生较大影响;相反在偏心方向角 $\beta=45^\circ$ 时定、转子的重叠区域变化最大,磁链的变化也相对明显。因此在偏心率相同时,DDSRM偏心方向角越大对于磁链影响越显著。图5(b)为静态偏心时不同偏心率 γ 下的磁链-角度特性,在偏心角度为 $\beta=90^\circ$ 时,将不同偏心率下的磁链特性进行对比。通过观察可知,随着转子偏心率 γ 的增大,DDSRM的磁链波形大致相同,幅值逐渐减小。在偏心率 $\gamma=50\%$ 时,磁链的变化相对于无偏心状态下受影响最大,幅值减小了12.01%。因此较大的偏心率对电机DDSRM磁链特性影响显著。

4 转子偏心时的振动分析

开关磁阻电机的具有非线性与饱和特性的步进磁场存在具有周期性非常强的转矩波动,电磁振动也是开关磁阻电机振动问题的一个重要方面。开关磁阻电机振动加剧会引起剧烈的噪声,严重影响电机正常运行。完成DDSRM的电磁学分析之后,重点是分析和抑制电机的振动和噪声,分析产生偏心故障后故障对电机正常运行的影响。首先建立DDSRM模型,进行Maxwell电磁场的有限元分析,



(a) DDSRM不同状态下径向磁密对比



(b) 偏心状态下磁径向力时分布图

图4 DDSRM偏心状态下径向磁密和径向力波形图

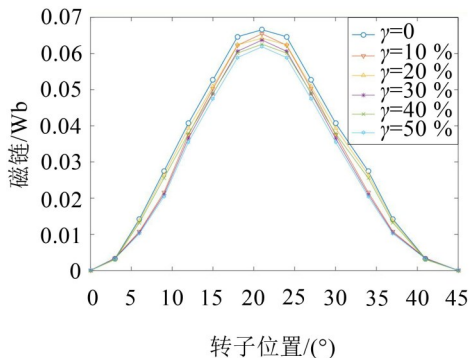
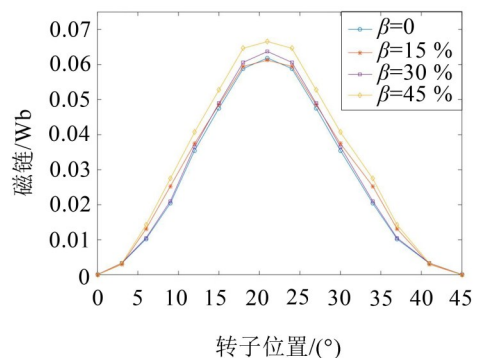
(a) 静态偏心时不同偏心方向角 β 下的磁链-角度特性(b) 静态偏心时不同偏心率 γ 下的磁链-角度特性

图5 静态偏心时不同偏心方向角和偏心率对应的磁链-角度特性

通过精细的网格剖分得到准确定子齿部的电磁径向力。采用谐响应分析模块,将二维电磁力扩展到三维电磁结构,根据计算完成的三维定子齿部电磁力载荷进行之后的振动分析,得到振动响应。最后将谐响应分析的振动速度和振动位移加载到定子外表面的空气域中,得到声压云图。

4.1 DDSRM 振动分析

谐响应分析中将定子内表面的电磁力作为激励源耦合到定子齿部表面,通过观察三维定子齿的结构变化,预测 DDSRM 的振动状态。电磁振动主要由定子的径向变形运动造成,偏心故障下齿部的受力出现不均匀。图6为定子铁芯齿部磁场径向力载荷分布图。首先,通过在软件中导入与电磁分析部分同等比例模型,建立 DDSRM 的定子外壳等效模型。需要设置定子铁芯硅钢材料参数,表2所示为仿真计算中定子铁芯材料的主要参数。其中 E_x 、 E_y 和 E_z 表示不同坐标方向下的杨氏模量, G_x 、 G_y 和 G_z 表示不同坐标方向下的剪切模量。分析在不同频率的正弦载荷下定子铁芯结构变化的过程,将电磁径向力作用在定子齿部中心。

表2 定子铁芯异性材料参数

材料参数	数值
密度	7 850 kg/m ³
泊松比	0.26
杨氏模量	$E_x=E_y=1.98 \times 10^{11}$ Pa
	$E_z=2.18 \times 10^{11}$ Pa
剪切模量	$G_{xy}=8.14 \times 10^{10}$ Pa
	$G_{xz}=G_{yz}=7.89 \times 10^{10}$ Pa

E: Harmonic Response
Remote Force
A Group 1: Remote Force: (Real) 11532, (Imag) 0. N
B Group 2: Remote Force: (Real) 116.69, (Imag) 0. N
C Group 3: Remote Force: (Real) 4.5468, (Imag) 0. N
D Group 4: Remote Force: (Real) 11487, (Imag) 0. N
E Group 5: Remote Force: (Real) 3.9353, (Imag) 0. N
F Group 6: Remote Force: (Real) 3.486, (Imag) 0. N
G Group 7: Remote Force: (Real) 11519, (Imag) 0. N
H Group 8: Remote Force: (Real) 116.58, (Imag) 0. N
I Group 9: Remote Force: (Real) 4.5674, (Imag) 0. N
J Group 10: Remote Force: (Real) 11486, (Imag) 0. N

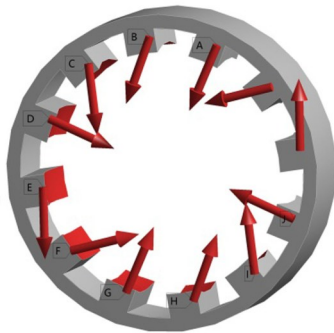


图6 定子铁芯齿部磁场径向力载荷分布图

通过分析 DDSRM 的电磁力可知,在偏心状态下径向电磁力不平衡会造成电机振动发生变化。在 50 Hz~2 500 Hz 范围内,对比偏心率为 50 % 和正常状态的 DDSRM 自转过程中的振动响应。图7为 DDSRM 定子铁芯位移云图。对比图7(a)和图7(b)可知,定子铁芯振动位移集中在定子齿部。因为4个定子绕组为一相激励,所以对称的4个定子齿部振动幅值相同,而偏心状态下的位移幅值则会更大。

在此频率范围内由于偏心的影响,转子质心的变化导致不平衡磁拉力的产生,使转子径向位移进一步增大,因此出现偏心状态下振动幅值增大的现象。图7(c)和图7(d)为 DDSRM 定子铁芯压力云图,偏心情况下各处振动的等效应力均会大于无偏心时的情况,同样证明偏心状态使径向力增大。

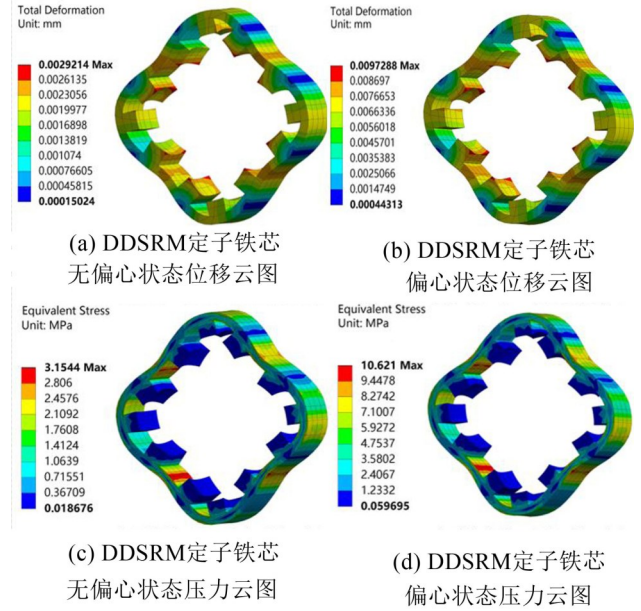


图7 DDSRM 定子铁芯位移云图和压力云图对比

图8为定子铁芯不同状态下振动加速度图,可发现额定转速下偏心故障对电机振动的位移有所影响。定子铁芯的固定频率和电磁径向力频率存在共振点,由于 DDSRM 无偏心状态下电磁力分布比较均匀和对称,定子铁芯主要振动频率在 1 200 Hz 和 1 900 Hz 附近取得极值,且振动幅度不随转速变化。在偏心状态,定子铁芯的不平衡磁拉力幅值增加,振动极值在 450 Hz 和 1 920 Hz 附近,且振动幅值相较于不偏心状态增加了 5 倍。

4.2 DDSRM 噪声分析

声压是声波传播介质的重要物理量,可以用媒介受压后的变化值来表示。声场的微分方程为 Helmholtz 方程为:

$$\nabla^2 p + \left(\frac{\omega^2}{v_0^2} \right) p = 0 \quad (14)$$

式中: ∇^2 为拉普拉斯微分算子; p 为噪声声压; ω 为声功率; v_0 为真空中声速。

电磁噪声的声压等级 L_w 表达式可以表示为:

$$L_w = \log_{10} \left(\frac{P_f}{P_{\text{ref}}} \right) \quad (15)$$

式中: P_f 为不同频率下的声功率; P_{ref} 为基准声功率。

DDSRM 噪声主要由定子铁芯径向运动造成的,通过声波媒介进行传播,图9(a)为电磁噪声分析

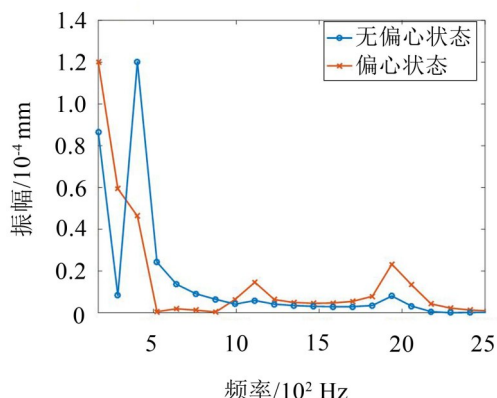


图8 定子铁芯不同状态下振动加速度图

流程图。为准确分析 DDSRM 在声场中的传播,通过谐响应分析出电机振动最大位移,计算求解发生偏心故障后的声功率。声场分析的求解域为在定子铁芯外径表面所建立大小为其 8 倍的空气域,空气域内圈为 DDSRM 外定子外表面,通过对空气域进行相应的网格剖分,将由谐响应计算出的振动速度加载到定子表面。设置振动位移作为噪声有限元模型的边界条件,将由有限元计算出的各个表面振动位移耦合到声学有限元模型上,求出电机周围不同频率下的声场。

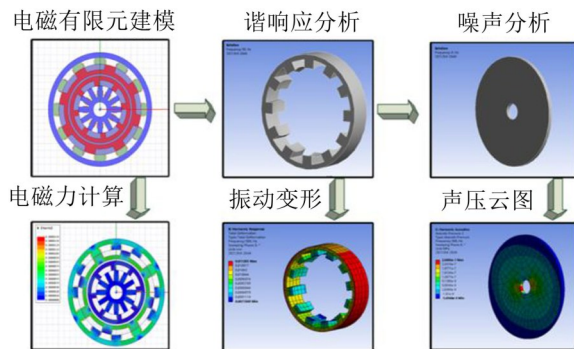
通过声场响应分析可见,图 9(b)中无偏心状态下 1 900 Hz 处和图 9(c)中偏心状态下 1 920 Hz 处噪声产生峰值。电机固有频率和电磁力波频率相同时产生共振,此时产生的噪声最大。偏心状态下电机噪声分布各处不均匀,峰值最高达到 97.09 dB,最小为 51.119 dB,相较于无偏心故障状态噪声峰值增加了 10.2 %。

5 结语

本文对一台额定功率为 2.5 kW 的可偏转双定子开关磁阻电机偏心故障进行研究,考虑到偏心种类和偏心角度的影响,进行电磁振动噪声耦合分析。在理论上对 DDSRM 进行数学建模,求解电机的气隙间距、磁路磁链和磁路特征,分析径向力分布对电机的影响。利用有限元软件 Maxwell 计算偏心状态下电磁径向力的时空分布和电磁特性的变化。通过导入相应的材料、结构,利用多物理场仿真对 DDSRM 进行振动和噪声分析。分析 DDSRM 电机的噪声和振动特性,可为电机设计提供理论参考。

本研究的主要结论如下:

(1) 当电机出现偏心故障时,气隙间距短的部分磁力线更密集,对比径向磁密波形可得磁密幅值增加 6.07 %,同时根据有限元仿真分析可知,电磁径向力也出现了畸变。磁链波形也出现了相应的变化,



(a) 电磁噪声分析流程图

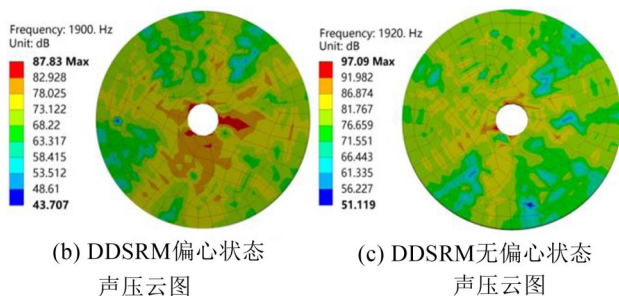


图9 DDSRM 电磁噪声分析流程图和声压云图

磁链大小减小了 12.01 %。

(2) 通过谐响应分析,对定子铁芯进行等效建模,对偏心故障下的 DDSRM 进行振动响应分析,通过有偏心状态和无偏心状态的振动位移图和压力云图对比可知,偏心状态下振动明显增加。并找到振动极值出现在 450 Hz 和 1 920 Hz 附近,且振动幅值相较于无偏心状态增加了 5 倍。

(3) 在偏心状态下振动达到极值时,发现在电机周围空气中,各处电机噪声分布不均匀,相较于无偏心故障状态噪声峰值增加了 10.2 %。

参考文献:

- [1] 葛兴来,胡晓,孙伟鑫,等. 永磁同步电机三矢量优化预测磁链控制[J]. 电机与控制学报,2021,25(8):9-17.
- [2] 闫文举,陈昊,马小平,等. 不同转子极数下磁场解耦型双定子开关磁阻电机的研究[J]. 电工技术学报,2021,36(14):2945-2956.
- [3] CAO R W, SU E C, LU M. Comparative study of permanent magnet assisted linear switched reluctance motor and linear flux switching permanent magnet motor for railway transportation[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(4): 1-5.
- [4] 吴红星,丁钊,赵国平,等. 开关磁阻电机发电及其控制方法综述[J]. 微电机,2014,47(4):78-85.
- [5] 闫文举,陈昊,马小平,等. 不同转子极数下磁场解耦型双定子开关磁阻电机的研究[J]. 电工技术学报,2021,36(14):2945-2956.

(下转第 44 页)