

基于定转子开窗的混合励磁双定子 BSRM 振动抑制*

项倩雯¹, 彭振德¹, 欧钰¹, 孙玉坤², 袁野¹

(1. 江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013;

2. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 无轴承开关磁阻电机 (BSRM) 由于容错性高、损耗小、效率高等优点在工业领域已得到广泛应用, 但电机运行时振动会限制其在某些领域的应用。以混合励磁双定子 BSRM 为研究对象引入一种在定转子齿部开窗的方法, 通过改变外定子或转子铁心磁阻大小, 可以减小气隙中的磁密大小, 达到减小电磁振动的目的。采用电磁有限元法与正交试验法优化窗口的位置和尺寸, 验证转子开窗对外定子径向力和转矩的影响, 最后通过模态叠加法验证转子开窗对振动响应的影响。结果表明, 该方法对混合励磁双定子 BSRM 电磁振动有较好的抑制效果但对电机转矩有一定影响。

关键词: 无轴承开关磁阻电机; 电磁振动; 定转子开窗; 磁阻; 磁密

中图分类号: TM352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)07-0043-08

doi: 10.12177/emca.2023.067

Vibration Suppression of Hybrid Excitation Double-Stator BSRM Based on Stator-Rotor Fenestrating*

XIANG Qianwen¹, PENG Zhende¹, OU Yu¹, SUN Yukun², YUAN Ye¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013 China;

2. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Bearingless switched reluctance motor (BSRM) has been widely used in industry due to its high fault tolerance, low loss and high efficiency, but the vibration during motor operation can affect its application in certain fields. Taking BSRM as the research object, a method of opening the window at the stator-rotor teeth is introduced. By changing the reluctance of stator or rotor core, the magnetic flux density in the air gap can be reduced, to achieve the purpose of reducing electromagnetic vibration. The position and size of windows are optimized by electromagnetic finite element method and orthogonal experimental method. Verify the impact of rotor window opening on radial force and torque of the external stator. Finally, the influence of rotor window opening on vibration response is verified by modal superposition method. The results show that the proposed method has a good suppression effect on the electromagnetic vibration of hybrid excitation double-stator BSRM, but has a certain influence on the torque of the motor.

Key words: bearingless switched reluctance motor (BSRM); electromagnetic vibration; stator-rotor fenestrating; reluctance; magnetic flux density

收稿日期: 2022-11-13; 收到修改稿日期: 2023-03-27

* 基金项目: 江苏省重点研发计划项目 (BE2021094)

作者简介: 项倩雯(1982—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为特种电机电磁设计及优化。

彭振德(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特种电机电磁设计优化和特种电机振动噪声分析。

孙玉坤(1958—), 男, 教授, 博导, 研究方向为特种电机设计、控制系统等。

0 引言

无轴承开关磁阻电机(BSRM)具备磁轴承与开关磁阻电机(SRM)的优点,因功率密度大、临界转速高、体积小、效率高,故在飞轮储能、磁悬浮列车、航空航天等领域的应用前景广阔^[1-3]。但BSRM双凸极结构、电流非连续性的特点使其在运行过程中具有较高的振动噪声,限制了其在某些对电机性能要求高的场合的应用,因此如何降低BSRM振动噪声成为目前该领域的重要研究方向之一。

BSRM运行时定子受径向电磁力作用发生形变从而产生振动噪声辐射,定子径向力频率和固有频率越接近,振动噪声就越强烈。目前国内外降低BSRM振动噪声的研究从控制策略和电机本体结构角度出发。文献[4-10]分别采用两相控制、换相角优化、模糊控制、神经网络、线性化控制等方法降低振动,这些降振措施大多从降低转矩脉动和减小径向力幅值的角度出发抑制振动。文献[11]提出一种平滑电压脉冲宽度调制(PWM)策略,通过降低关断换流角期间的电压变化率从而降低振动噪声。文献[12]引入电流高次谐波使电流波形的均方根值达到最低,控制电机加速度从而减弱振动。文献[13]表明不同绕组结构对电机振动噪声有影响。文献[14]提出改变定子轭形状对振动有抑制效果。文献[15]通过改变散热筋结构降低了SRM的振动。文献[16]提出在转子齿两侧开槽有助于减弱径向力从而减小振动。上述控制策略减振会产生较高的开关损耗和较低的转矩密度,改变电机结构从而降低振动但同时会降低电机效率。

目前针对双定子BSRM振动研究较少,混合励磁双定子BSRM有内外两个定子,在飞轮电池等领域应用时产生的振动也不可忽略,但是由于双定子电机转子与内定子闭合,并且混合励磁双定子BSRM内定子通过定向控制电流产生悬浮力,外定子三相轮流导通产生转矩,振动主要是由外定子形变振动并与壳体相连引起,混合励磁双定子BSRM电磁振动主要源于外定子所受径向力发生形变产生的振动噪声辐射^[17-19]。

本文提出混合励磁双定子BSRM在外定子和转子齿开窗以增大铁心磁阻,减小磁通,降低径向

力,最终减弱电磁振动。通过2-D有限元法计算不同开窗位置及不同窗口尺寸时电磁转矩和外定子径向力大小,验证在转子齿铁心开窗时可减弱电磁振动。采用正交试验法确定最优电机最优开窗参数,通过3-D结构场模态叠加法进行电机振动加速度和振动响应分析,验证本方案对电机振动抑制的有效性。

1 电机运行机理与振动抑制方法

1.1 电机运行机理

混合励磁双定子BSRM由24极外定子、12极转子、8极混合内定子构成,电机运行机理如图1所示。外定子分A、B、C三相与转子根据磁阻最小原理产生转矩,以A相为例,励磁后产生磁力线在外定子、气隙、转子构成闭合回路,磁场形变产生切向磁拉力从而产生转矩。内定子与永磁体共同励磁产生稳定悬浮力,以x方向为例,转向往x负方向偏移时,浅色路径为永磁体产生偏置磁通,深色路径为x方向绕组励磁产生控制磁通,在x正方向控制磁通和偏置磁场相互叠加产生正向悬浮力,转子回到平衡位置,实现转矩与悬浮自解耦的同时降低转矩脉动提高悬浮力。

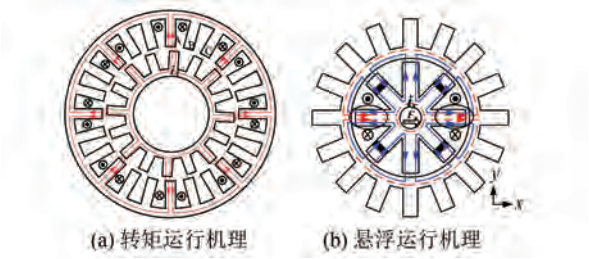


图1 电机运行机理图

混合励磁双定子BSRM的设计目标如表1所示。

表1 混合励磁双定子BSRM设计目标

参数名称	参数值
额定功率 P_N/kW	1.6
效率 $\eta/\%$	75
轴径 D_{isi}/mm	10
最大悬浮力 F_{max}/N	150
额定转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	7 000
额定电压 U/V	220

表2为电机主要结构参数。

表 2 电机的主要参数

参数名称	参数值
转子外径 D_{ro}/mm	72
轴长 l_z/mm	37.5
内定子占空率 f_i	2/3
悬浮气隙 l_{gm}/mm	0.3
转矩气隙长度 l_t/mm	0.3
外定子内径 D_{osi}/mm	72.6
转子齿高 h_{cr}/mm	9.6
转子极弧 $\beta_r/(\circ)$	9
转子极宽 b_r/mm	5.65
外定子轭厚 h_{os}/mm	3.99
转子轭厚 h_r/mm	3.96
外定子外径 D_{oso}/mm	113
转矩绕组每相匝数 N_t	37
内定子外径 D_{iso}/mm	44.4

1.2 基于定转子齿开窗的电磁振动削弱方法

混合励磁双定子 BSRM 电磁振动源于外定子气隙磁场产生的电磁力,外定子径向电磁力的幅值和力波频率对电机振动影响较大,当外定子径向电磁力和电机模态固有频率接近时会发生共振现象。根据麦克斯韦张量法,外定子表面所受径向力 F_r 和切向力 F_t 与磁密 B 的关系分别为^[17]

$$\begin{cases} F_t = \iint \frac{1}{\mu_0} (B \cdot n) B ds = \frac{1}{\mu_0} \iint B_r B_t ds \\ F_r = \iint \frac{1}{2\mu_0} \nabla B^2 n ds = \frac{1}{2\mu_0} \iint (B_r^2 - B_t^2) ds \end{cases} \quad (1)$$

式中: μ_0 为真空磁导率,其大小为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; n 为单位法向量; B_r 和 B_t 分别为外定子与转子气隙径向磁密和切向磁密。

定义 θ 为转子位置角, A 相外定子与转子齿极对齐时 $\theta=0$ 此时外定子所受径向力最大,在 $\theta=15^\circ$ 时径向力最小,作用在转子极上的转矩 T_t 表达式为

$$T_t = p \cdot F_t \frac{D_{ro}}{2} = \frac{D_{ro}}{2} \iint f_t ds = \frac{D_{ro}}{2\mu_0} \iint B_r B_t ds \quad (2)$$

式中: D_{ro} 为转子外径; p 为转子极数; f_t 为切向力。

不开窗时外定子与转子极铁心磁阻可定义为

$$\begin{cases} R_s = \frac{l_s}{\mu_{\text{steel}} S_s} \\ R_r = \frac{l_r}{\mu_{\text{steel}} S_r} \end{cases} \quad (3)$$

式中: l_s 和 l_r 分别为外定子与转子磁通路径有效长度; μ_{steel} 为铁心磁导率; S_s 和 S_r 分别为外定子和转子极通过磁通截面积。

若选择外定子与转子开窗,如图 2 所示,其中窗宽为 $a_1=a_2=a$,窗高为 $b_1=b_2=b$,窗口与齿尖距离为 $h_1=h_2=h$ 。

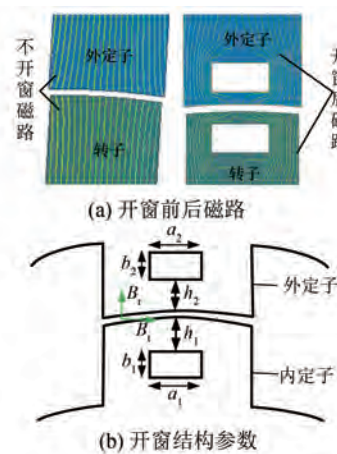


图 2 定转子开窗示意图

加窗后的外定子与转子极磁阻可表示为

$$R_{s_h} = \frac{l_s + l_{s_h}}{\mu_{\text{steel}} (S_s - S_{s_h})} R_{r_h} = \frac{l_r + l_{r_h}}{\mu_{\text{steel}} (S_r - S_{r_h})} \quad (4)$$

式中: l_{s_h} 、 l_{r_h} 分别为外定子和转子变化的等效磁路长度; S_{s_h} 、 S_{r_h} 分别为外定子和转子窗口的截面积。

由图 2 可知,外定子与转子开窗会影响磁通路径有效长度和横截面积,由式(3)和式(4)可知开窗增加了外定子与转子中铁心的磁阻,降低了磁通,由式(1)可知降低外定子所受径向电磁力,从而减小由外定子所受径向力产生的电磁振动。结合式(2)可知,开窗还会降低外定子所受切向电磁力,影响转矩。因此,提出一种在转子和外定子齿部开窗的方法,既能获得足够的电磁转矩,又能减小外定子径向电磁力达到抑制电磁振动的目的。

综上所述,在外定子与转子齿部位置选择开窗,如图2所示,可以削弱电机外定子所受径向力产生的振动但同时会影响电磁转矩。在保证机械强度的前提下,选取定转子齿窗口参数: $a = 2\text{ mm}$, $b = 1.5\text{ mm}$, $h = 0.5\text{ mm}$,初步验证开窗对抑制电磁振动的可行性。开窗前后混合励磁双定子BSRM单相通电时,在 $t = 0$ 时外定子气隙磁密沿圆周方向径向分量和切向分量分布如图3所示,可以看出,在磁密绝对值最大位置 $\theta = 45^\circ$ 处,开窗后外定子径向磁密减小了10%,切向磁密减小了60%,此时径向力为 0.83 N ,转矩为 $1.2\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

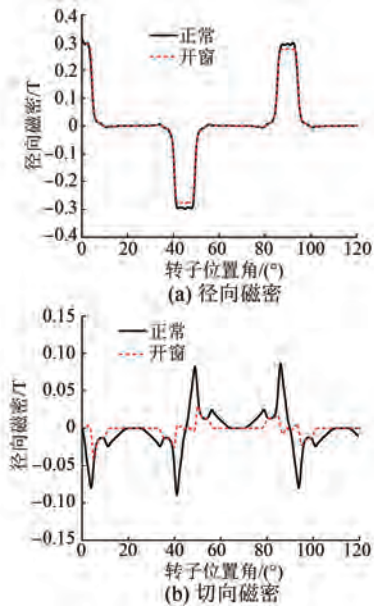


图3 磁密对比图

2 不同位置开窗及参数优化

由上述分析可知,开窗可以减小外定子径向力从而减弱电磁振动,但会影响切向力和转矩的产生,因此需要对窗口最佳位置和尺寸进行优化,从而实现在对电磁转矩影响最小的情况下减小外定子径向力产生的电磁振动。定义平均转矩 T_{avg} 和外定子所受径向力幅值 F_{max} 的比值为性能指数 P ,来评估窗口设计的有效性,性能指数 P 最大时所对应的窗口参数即为最优解:

$$P = \frac{T_{avg}}{F_{max}} \times 100\% \tag{6}$$

在额定转速 $7\,000\text{ r/min}$ 的条件下,研究窗口设置在不同齿部以及不同窗口尺寸对外定子径向

电磁力和平均转矩的影响,确定最优的开窗方式及其参数。

2.1 窗口位置的影响

设电机在空载下运行,保持窗口尺寸大小不变,在保证机械强度的基础上,初步选择 $a = 2\text{ mm}$, $b = 1.5\text{ mm}$, $h = 0.5\text{ mm}$; $a = 2.5\text{ mm}$, $b = 2\text{ mm}$, $h = 1\text{ mm}$ 和 $a = 2.5\text{ mm}$, $b = 2\text{ mm}$, $h = 1.5\text{ mm}$ 三组窗口参数分别标号①②③,采用二维瞬态有限元分析三组参数对应窗口位于外定子齿、转子齿及同时在外定子和转子齿开窗时对平均转矩和外定子径向力幅值的影响。

图4为窗口位于不同位置时平均转矩 T_{avg} 和外定子径向力幅值 F_{max} 对比图,通过变化曲线可以看出①②③三组参数对应不同开窗位置的平均转矩和外定子径向电磁力变化趋势相同,其中在外定子与转子齿同时开窗时 F_{max} 最小,同时产生的 T_{avg} 也下降最大。

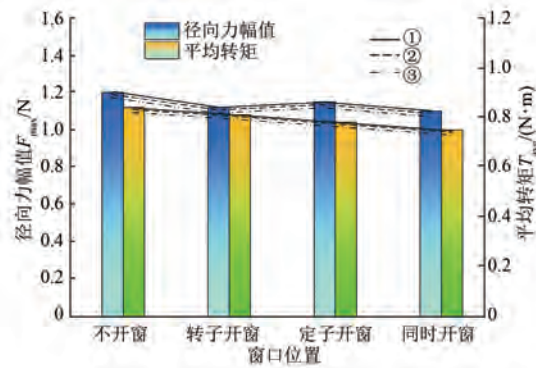


图4 不同开窗位置径向悬浮力和平均转矩

选择第二组参数对应三种开窗方式下的平均转矩和外定子径向力如表3所示,对标性能指数 P 选择在转子齿部开窗的方案减小电磁振动,此时对电机电磁转矩影响最小。

表3 外定子径向力幅值下平均转矩 T_{avg} 和性能指数

项目	不开窗	同时开窗	转子开窗	外定子开窗
F/N	1.20	1.10	1.12	1.15
$T_{avg}/(\text{N}\cdot\text{m})$	0.84	0.75	0.81	0.78
$P/\%$	70.0	68.2	72.3	67.8

2.2 窗口高度的影响

选取在转子齿部开窗方式减弱电磁振动,参考2.1节参数,选择窗口尺寸 $a = 2.5\text{ mm}$, $h = 1\text{ mm}$,将窗口高度 b 分别取不同值(为保持充足

的机械强度,本模型最大窗口高度取 4.2 mm) 分别对电机平均转矩 T_{avg} 和外定子径向力幅值 F_{max} 进行有限元仿真,如图 5 所示。可见 F_{max} 和 T_{avg} 均随着窗口高度 b 的增加先减小后略有增加后再减小, $b=0.5$ mm 时 F_{max} 减小比例最小,仅为 3.9%, $b=3.2$ mm 时对 T_{avg} 影响最小,为 1.8%, $b=4.2$ mm 时 F_{max} 和 T_{avg} 减小的幅度最大,与不开窗时相比,各减小了 6.7% 和 4.7%。此参数下转矩由 1.14 N·m 降为 0.9 N·m,外定子径向力由 1.2 N 降为 0.82 N,综上可知窗口高度 b 对外定子径向力和转矩均有影响。

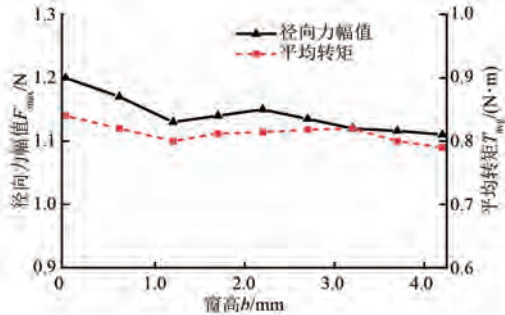


图 5 不同窗高仿真结果

2.3 窗口宽度的影响

基于 2.2 节窗口参数分析, $b=2.2$ mm 时性能指数 P 最大,故选 $b=2.2$ mm, $h=1$ mm,窗宽 a 在 1~4 mm 范围内变化,外定子径向力 F_{max} 和平均转矩 T_{avg} 变化趋势如图 6 所示。可见 F_{max} 随着 a 的增加先略有增加后一直减小,4 mm 时减小力度最大为 16.7%, T_{avg} 先增加后减小但相较 F_{max} 减小趋势不大,同样 $a=4$ mm 时 T_{avg} 减小最大,此时平均转矩为 0.78 N·m,外定子径向力为 0.7 N。

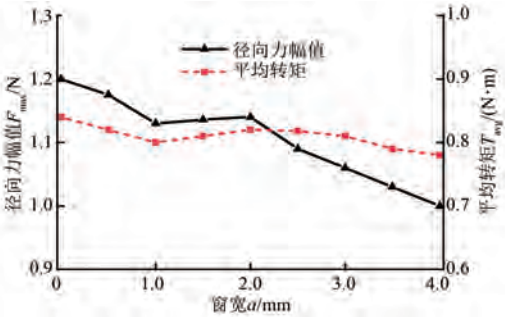


图 6 不同窗宽仿真结果

2.4 窗口与齿尖距离的影响

基于上述窗口参数分析,设置 $a=2.5$ mm, $b=$

2.2 mm,窗口的上边缘与转子齿尖距离 h 在 1~3 mm 取不同值,外定子径向力 F_{max} 和平均转矩 T_{avg} 随 h 变化趋势如图 7 所示。可以看出 $h=1$ mm 时 F_{max} 最大,随着距离 h 的增加趋于稳定,这是因为窗口距离齿间太近而对气隙磁场影响较大,而 T_{avg} 在 $h=1\sim 2$ mm 时趋于稳定,在 $h=2.5$ mm 时最大为 1.12 N·m, $h=3$ mm 时 T_{avg} 最小为 0.79 N·m,故 h 对电磁振动的削弱也会产生影响同时对转矩也有影响。

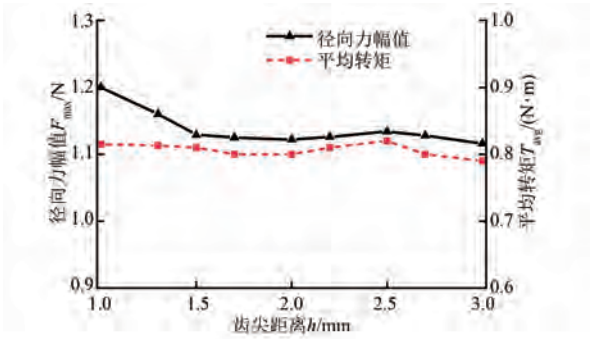


图 7 不同齿尖距离仿真结果

2.5 电机的开窗方案

由于窗口的宽 a 、高 b 、距离齿间的距离 h 之间存在耦合,若从中选取 4 个数值较好的参数进行组合,采取一一配对的方式,则需要进行 64 次试验,增加了仿真时间。故此处窗口参数的选择采取正交试验法进行选择。

依据之前所得的窗口参数对外定子径向力幅值和平均转矩影响的变化曲线,以性能指数 P 最大为参考标准,每个因素挑选四个不同水平的对应参数,并制作水平因素表,如表 4 所示。结合图 5~图 7,综合考虑,选择如表 4 所示数据作为正交试验优化参数水平。

表 4 正交试验参数水平

水平因素	a/mm	b/mm	h/mm
1	1.0	1.2	1
2	2.0	2.2	1.5
3	3.0	3.2	2.0
4	4.0	4.2	2.5

选择正交表 $L_{16}(4^3)$ 的一部分作为设计正交试验表的依据,并依照水平因素表的序号填入正交表,得到正交试验表。试验结果以平均转矩

T_{avg} 与外定子径向力的幅值 F_{max} 的比值得到性能指数 P 为评判标准,如表 5 所示。

表 5 正交试验表

试验号	a/mm	b/mm	h/mm	$T_{avg}/(N \cdot m)$	F_{max}/N	$P/\%$
1	1(1.0)	1(1.2)	1(1.0)	0.84	1.11	69.4
2	1(1.0)	2(2.2)	2(1.5)	0.83	1.10	69.1
3	1(1.0)	3(3.2)	3(2.0)	0.83	1.10	69.1
4	1(1.0)	4(4.2)	4(2.5)	0.82	1.09	69.0
5	2(2.0)	1(1.2)	2(1.5)	0.82	1.09	69.0
6	2(2.0)	2(2.2)	1(1.0)	0.81	1.08	68.6
7	2(2.0)	3(3.2)	4(2.5)	0.80	1.08	67.8
8	2(2.0)	4(4.2)	3(2.0)	0.81	1.06	68.4
9	3(3.0)	1(1.2)	3(2.5)	0.80	1.05	69.5
10	3(3.0)	2(2.2)	4(2.0)	0.82	1.03	72.5
11	3(3.0)	3(3.2)	1(1)	0.81	1.05	70.4
12	3(3.0)	4(4.2)	2(1.5)	0.80	1.03	70.1
13	4(4.0)	1(1.2)	4(2.5)	0.81	1.05	70
14	4(4.0)	2(2.2)	3(2)	0.78	1.05	67.8
15	4(4.0)	3(3.2)	2(1.5)	0.79	1.06	68.1
16	4(4.0)	4(4.2)	1(1.0)	0.77	1.04	67.5

将上述正交试验表中的参数依次进行仿真,得到平均转矩 T_{avg} 与外定子最大径向力 F_{max} ,经过对比,可以看出试验号为 10 的试验所得结果最优,此时 $T_{avg}=0.82\text{ N}\cdot\text{m}$,与正交优化前相比仅降低了 2.3%; $F_{max}=1.03\text{ N}$,与优化前相比降低了 5.8%。

根据上述正交试验法分析,确定了本文电机开窗方案,选择在转子齿部开窗,确定窗宽 $a=3\text{ mm}$ 和窗高 $b=2.0\text{ mm}$,窗口位置与齿顶距离 $h=2.0\text{ mm}$ 为最佳窗口尺寸。选取 1/3 转子周期外定子气隙径向力曲线,开窗前后的对比如图 8(a)所示,转子开窗后的外定子径向力在定转子齿重合区域 $\theta=45^\circ$ 时减小了 5.7%;选取半个周期开窗前后瞬时转矩变化曲线如图 8(b)所示,开窗对瞬时转矩略有影响,瞬时转矩减小了 2.2%,此时,平均转矩 T_{avg} 由之前的 $1.2\text{ N}\cdot\text{m}$ 降为 $1.13\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

综上所述,选择合适的开窗位置及窗口尺寸可使混合励磁双定子 BSRM 的外定子径向力减小且对转矩影响较小保证电机输出效率,从而对电

磁振动有较好的抑制效果。

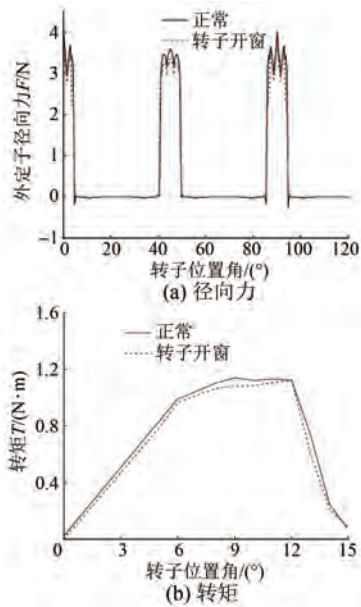


图 8 开窗前后仿真结果对比

3 有限元验证

3.1 验证系统图

目前针对混合励磁双定子 BSRM 的电磁振动仿真,需计算出在电磁力作用下的电机表面振动响应,需将 Maxwell 计算出的电磁力与有限元模型导入 Workbench 软件中,整个流程涉及电磁场分析、结构场模态分析和谐波响应分析步骤,具体系统流程如图 9 所示。本文电机基本参数为表 1 和表 2,将初始电机 A 按照第 2 节方案指定的窗口尺寸进行特殊设计变成电机 B,将 A、B 两个电机分别在采用有限元法计算电磁场得到施加到外定子齿部的径向电磁力,在结构场中将径向电磁力作用在定子齿部,并用模态叠加法得到此时的电机振动响应。

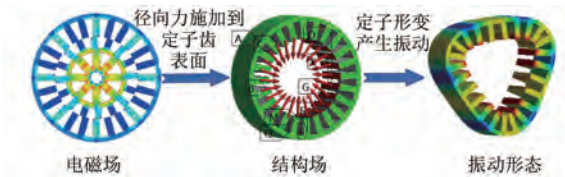


图 9 仿真系统图

3.2 振动响应分析

设置混合励磁双定子 BSRM 的外定子表面为

振动响应面,图 10 为电机 7 000 r/min 运行时外定子表面振动加速度响应和振动响应频谱。可以看出,在频率为 1 958 Hz、3 732 Hz、5 598 Hz 和 7 464 Hz 附近时振动响应较为明显,以频率在 3 732 Hz 附近时外定子表面的振动响应为例,在频率为 3 732 Hz 时转子开窗后的振动加速度比正常电机结构振动加速度小了 5.9%,并由振动响应频谱分析得出频率为 3 732 Hz 时,正常结构电机最大振动响应为 88 dB,转子开窗后电机最大振动响应为 71 dB,比正常结构电机振动响应减小了 19.3%。

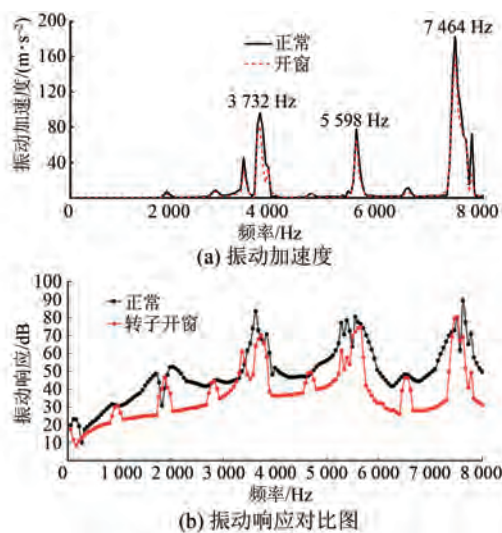


图 10 振动响应结果分析对比图

使用快速傅里叶法对振动加速度和振动响应数据进行频域分析,由于电机的低频振动对电机性能影响较大^[21],选取 0~2 000 Hz 范围内频谱,如图 11 所示,可以看出转子开窗电机振动加速度和振动响应的幅值明显低于普通电机,同一频率下振动响应减小了约 38%。

从以上振动响应分析结果可以明显看出,转子齿部开窗可明显降低混合励磁双定子 BSRM 电磁振动,故该方案具有一定的可行性。

4 结 语

本文提出一种在定转子齿部开窗的方案,通过试验验证,最终确定新的转子结构可以有效降低径向电磁力产生的电磁振动,通过有限元分析法和模态叠加法得出如下结论:

(1) 新结构可以降低混合励磁双定子 BSRM

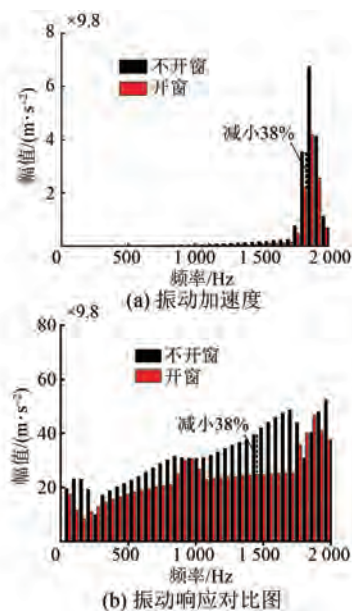


图 11 振动响应频谱对比图

径向电磁力从而削弱电磁振动,但同时会影响电磁转矩大小。由于试验条件的限制,未通过实际样机验证电磁振动的削弱,未来会展开这方面研究。

(2) 开窗的位置及窗口的尺寸对电机电磁振动、电磁转矩影响较大,需要在保证充足的转矩下选择适当的窗口尺寸,本文的开窗尺寸是采用正交试验法基于最佳性能指数获得的。

(3) 本方案是通过增大铁心磁阻降低磁通从而减小径向力,达到削弱电磁振动的目的,这种方法制造和改造成本低,易于实现,具有良好的工程实现意义,也为其他电机降低电磁振动提供了参考。

【参考文献】

- [1] FERREIRA C A, JONES S R, HEGLUND W S, et al. Detailed design of a 30-kW switched reluctance starter/generator system for a gas turbine engine application [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(3): 553.
- [2] YANG G, DENG Z, CAO X, et al. Optimal winding arrangements of a bearingless switched reluctance motor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(6): 3056.
- [3] 严仰光, 秦海鸿, 龚春英, 等. 多电机与电力电子 [J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(1): 11.

- [4] WILSON V, LATHA P G. Performance analysis of SRM with two stage commutation for effective vibration reduction [C] // 2021 IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON), 2021.
- [5] KANDHASAMY S. Machine learning based SRM control using FPGAs for torque ripple minimization [C] // 2020 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC), 2020.
- [6] VUJIČIĆ V P. Minimization of torque ripple and copper losses in switched reluctance drive [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27 (1) : 388.
- [7] SAHOO S K, PANDA S K, XU J X. Iterative learning control based direct instantaneous torque control of switched reluctance motors [C] // 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, 2004.
- [8] 孙剑波, 詹琼华, 王双红, 等. 开关磁阻电机减振降噪和低转矩脉动控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2008 (12) : 134.
- [9] REZIG A, BOUDENDOUNA W, DJERDIR A, et al. Investigation of optimal control for vibration and noise reduction in-wheel switched reluctance motor used in electric vehicle [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2020, 167 : 267.
- [10] NGUYEN D, BAHRI I, KREBS G, et al. Vibration study of the intermittent control for a switched reluctance machine [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2019, 158 : 308.
- [11] ZHANG Z, BAZZI A M, MONTE J D. A novel PWM-control-based strategy for noise reduction in switched reluctance motors [C] // 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2018.
- [12] GUNDOGMUS O, DAS S, CHOWDHURY A, et al. Direct acceleration harmonic control with current harmonics injection method to reduce acoustic noise and vibration in switched reluctance machines [C] // 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2021.
- [13] GUO X, LIN J, XU Q, et al. A comparative study of mechanical vibration between conventional and mutually-coupled switched reluctance machines [C] // 2021 24th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2021.
- [14] ZHANG X, XIONG L, ZHAI H, et al. A new structure of switched reluctance motor with pole shoes on teeth of stator [C] // 2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2020.
- [15] 孙剑波, 詹琼华. 一种利于开关磁阻电机降噪的新散热筋结构 [J]. 电工技术学报, 2005 (9) : 34.
- [16] ZHANG X, WANG X, YANG Y. The calculation of radial force wave weakened percentage for doubly salient motor based on improved magnetic field division method [C] // 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014.
- [17] 张鑫, 王秀和, 杨玉波, 等. 基于转子齿两侧开槽的开关磁阻电机振动抑制方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (6) : 1508.
- [18] GUNDOGMUS O, DAS S, YASA Y, et al. Acoustic noise mitigation in high pole count switched reluctance machines utilizing skewing method on stator and rotor poles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69 (6) , 5581.
- [19] ISFAHANI A H, FAHIMI B. Vibration analysis of a double-stator switched reluctance machine [C] // 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2018.

(上接第 42 页)

- [14] KWON Y, SUL S, BALOCH N A, et al. Design of IPMSM with eccentric rotor and search coils for absolute position sensorless drive [C] // 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), 2015.
- [15] KWON Y, SUL S, BALOCH N A, et al. Design, modeling, and control of an IPMSM with an asymmetric rotor and search coils for absolute position sensorless drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52 (5) : 3839.