

宽转子无轴承开关磁阻电机的转子极形优化

周云红, 李汉杰*, 孟思洁, 刘晨宇, 谭正一

(南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167)

Optimization of Rotor Pole Shape for Bearingless Switched Reluctance Motor with Wide Rotor

ZHOU Yunhong, LI Hanjie*, MENG Sijie, LIU Chenyu, TAN Zhengyi

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

Abstract: In order to solve the problem of wide rotor bearingless switched reluctance motors are prone to large torque ripple during operation due to the switching power supply method and double salient iron core structure, the rotor structure of a bearingless switched reluctance motor with wide rotor is improved by slotting on both sides of the rotor. By increasing the air gap magnetic resistance near the slots, the tangential air gap magnetic density used to generate torque can be increased, so that the torque ripple can be reduced. After the slots are parameterized, the control variates method is used to analyze the impact of slotting parameters on torque performance, and the slotting parameters are finally determined with the goal of optimizing performance indicators. By using the method of field circuit coupling, the finite element analysis model of the motor and the direct instantaneous torque control circuit model are combined to achieve the dynamic operation of the motor system. The simulation results show that slotting on the rotor can effectively reduce the torque ripple of the bearingless switched reluctance motor with wide rotor, and improve the average torque, while has little impact on radial suspension force.

Key words: bearingless switched reluctance motor; wide rotor; torque ripple suppression; optimization

摘 要: 为了解决宽转子无轴承开关磁阻电机由于开关型供电方式以及双凸极铁心结构在运行过程中容易导致

转矩脉动很大的问题,本文对其转子极结构进行改进,提出在转子极两侧开槽的优化设计方案。旨在通过增大开槽处的气隙磁阻,提高用于产生转矩的切向分量的气隙磁密,从而降低转矩脉动。对所开槽进行参数化处理,使用控制变量法分析各开槽参数对转矩性能的影响,以性能指标最优为目标确定开槽参数。利用场路耦合的方法将电机有限元分析模型和直接瞬时转矩控制电路模型结合起来,实现电机系统的动态运行。仿真结果表明转子极开槽后能够有效降低宽转子无轴承开关磁阻电机的转矩脉动,提升平均转矩,并且对径向悬浮力的影响很小。

关键词: 无轴承开关磁阻电机; 宽转子; 转矩脉动抑制; 转子极形优化

0 引言

开关磁阻电机(SRM)具有结构简单、成本低廉、参数可控性高、调速范围宽和维护方便等突出优点,在新能源汽车等领域有广泛的应用前景^[1-3]。但其转矩脉动和噪声较大,一定程度上限制了发展,因此开关磁阻电机转矩脉动抑制成为该领域的热门课题^[4-5]。

国内外许多专家学者在此方面做出了大量研究,大致可以分为两个方向:一是控制策略方面的改进。文献[6]根据插值法建立了电机转矩逆模型的控制策略,并利用转矩分配函数来控制转矩输出,从而抑制转矩脉动。文献[7]在使用分配函数的基础上增加了一套转矩补偿器,来使电机转矩输出更稳定。文献[8-9]利用直接转矩控制的方法,降低转矩脉动,优化调速性能。文献[10-12]都利用了直接瞬时转矩控制策略,实现对电机转矩的实时监测与控制,提高其动态响应速度,有效地抑制了转矩脉动。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51977103);江苏省重点研发计划项目(BE2021094);南京工程学院科技创新基金项目(YKJ202208);江苏省大学生科技创新项目(202211276060Y)

Projects supported by National Natural Science Foundation (51977103); Key R&D Plan Project in Jiangsu Province (BE2021094); Science and Technology Innovation Fund of Nanjing Institute of Technology (YKJ202208); Jiangsu Province College Student Science and Technology Innovation Project (202211276060Y)

另一方向就是电机本体结构的改进。文献[13]中在电机转子两侧开孔的基础上,对定子齿顶开槽,并利用参数化计算,得到最优尺寸,有效抑制了转矩脉动。文献[14]提出在定子极顶端单侧添加极靴,通过调节气隙磁导,减小转矩脉动。文献[15]提出在定子极单侧加极靴并在转子极另一侧顶部开槽,改变定子极边缘磁通分布,减少磁路饱和,从而抑制转矩脉动。同时还运用多目标随机粒子群算法,对电机结构参数进行优化,结合模糊集合理论确定了最优的结构参数。文献[16]对电机定转子极面进行改进,改变了定转子极面之间的气隙长度,并在此基础上对转子两侧开槽,提高转矩输出,降低转矩脉动。文献[17]中设计了一种新型的带极靴的转子齿,并在此基础上对转子两侧开槽,并对极靴位置以及槽形进行优化,有效地抑制转矩脉动。文献[18]在定转子齿同时开矩形槽,减小定转子之间的径向磁密,降低了转矩脉动。

本文从 12/8 极宽转子无轴承开关磁阻电机 (BSRMWR) 转矩脉动大的问题入手,分析其结构特点,阐述双相导通解耦运行原理以及转子极两侧开槽的结构改进思路。通过参数化扫描的方式,综合优化了开槽参数。利用 Maxwell-simplorer 场路联合仿真的方式,分别为转子极开槽前后的 BSRMWR 搭建了直接瞬时转矩控制 (DITC) 系统模型,仿真结果表明能够有效地提高转矩相绕组换相期间的转矩输出,从而降低转矩脉动,使得电机转矩能够更平稳。

1 电机结构与运行原理

以 12/8 极 BSRMWR 为例,图 1 为拓扑结构示意图。该电机的定子铁心和转子铁心同心相套,分别设有定子极和转子极,极弧角分别为 15° 和 30° 。由于转子极弧宽于定子极弧,故称为“宽转子”电机。转子上没有绕组和永磁体,完全由硅钢片叠压而成。每个定子极上绕有 N 匝绕组,径向垂直相对的四极绕组构成一相,但彼此并不串接,电流均可以独立控制,磁通呈 NSNS 分布。12 极绕组共分为 A、B、C 三相(图中未画出 B、C 相绕组)。

该三相电机共 8 个转子极,故三相绕组的自感之间依次相差 15° 。以 A 相绕组定、转子极轴

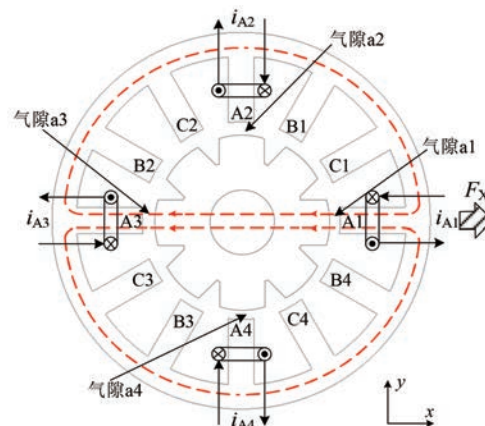


图 1 BSRMWR 拓扑结构示意图

Fig. 1 Topology structure diagram of BSRMWR

线重合时为 0° 参考位置,设转子顺时针旋转,画出三相自电感分布曲线示意图,如图 2 所示。在转子位置角从 -22.5° 逐渐过渡到 22.5° 的过程中,三相绕组的自感均呈周期性变化,这是由于绕组自感正比于转子极与该相定子极的对齐面积。

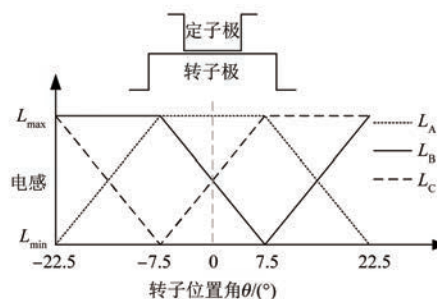


图 2 三相自感分布曲线示意图

Fig. 2 Distribution curve of three phase self-inductances

采用“双相导通”运行模式,以实现电磁转矩与悬浮力的解耦运行^[19]。转矩相和悬浮相的选择要依据转子位置角来确定,以电机顺时针电动运行为例,具体导通规则如图 3 所示。一相绕组工作于转矩有效区,称作“转矩相”,记作“T”相,通过对称励磁产生电磁转矩;另一相绕组工作于悬浮有效区,称作“悬浮相”,记作“F”相,通过不对称励磁产生径向悬浮力^[20]。

2 转子结构改进思路

转矩相绕组换相期间的转矩跌落是造成 BSRMWR 转矩脉动非常严重的关键因素。为此,本节从电机本体结构优化的角度来对转子极进行开槽优化,实际上改变的是气隙磁导,在转子极两

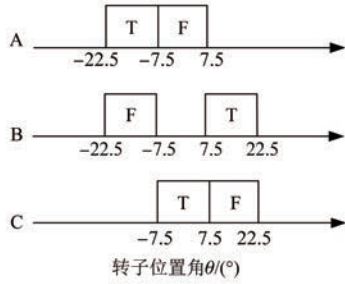


图3 工作区间示意图

Fig. 3 Schematic diagram of working area

侧开槽后,所开槽处的磁导将由铁心磁导改变为气隙磁导,磁导显著减小,相应的磁阻会显著增加。

以图4(a)所示位置为例,电流 i_{a1} 在气隙 $a1$ 内产生的气隙磁密中除了主气隙磁密分量 B_m 外,还有两个边缘磁密分量 B_{f0} 、 B_{f1} 。其中 B_{f1} 会从转子极右侧表面进入,相应的磁力线由定子铁心流出到气隙,然后再由气隙流入到转子铁心,共流过了空气和铁心两种介质。

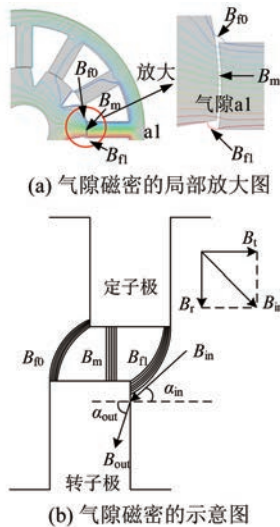


图4 气隙磁密

Fig. 4 Magnetic air gap flux density

磁力线流经两种不同的介质时会产生折射现象,示意图如图4(b)所示。可以看出,转子极表面就是空气和铁心两种媒质的分界面。定义 B_{f1} 进入转子极右侧表面的方向与法线的夹角为入射角 α_{in} ,之后从转子极右侧表面出射的方向与法线的夹角为出射角 α_{out} 。满足:

$$\frac{\tan \alpha_{in}}{\tan \alpha_{out}} = \frac{\mu_0}{\mu_{Fe}} \quad (1)$$

周云红,等:宽转子无轴承开关磁阻电机的转子极形优化

式中: μ_{Fe} 为铁心磁导率; μ_0 为空气磁导率。

由于 $\mu_0 \ll \mu_{Fe}$, 因此出射角 α_{out} 接近 90° 。类似地,当转子极逆时针旋转时, B_{f0} 将进入转子极左侧表面,之后从转子极左侧表面出射的角度也接近 90° 。

为了提高表述的通用性,将进入转子极侧面的气隙磁密记作 B_{in} ,其径向分量 B_r 和切向分量 B_t 分别满足:

$$B_r = B_{in} \sin \alpha_{in} \quad (2)$$

$$B_t = B_{in} \cos \alpha_{in} \quad (3)$$

为了使该电机在顺时针和逆时针旋转时,都能够减小转矩脉动,尝试在转子极两侧开槽以增大开槽处的磁阻,使转子极侧面的磁力线从开槽处的上方流通。转子极两侧开槽后,电机的磁密示意图如图5所示,可以看到出射角会由原本的 α_{out} 减小至 β_{out} ,相应的入射角也由 α_{in} 减小至 β_{in} 。随着入射角的减小,流经转子极侧面的边缘气隙磁密中切向分量会增加,电磁转矩也会相应地增大,这种影响在转矩相绕组换相期间最明显。

需要说明的是,此处所说的通过在转子极两侧开槽来增大电磁转矩主要是能提高转矩绕组换相期间的电磁转矩,尤其提高瞬时转矩的最小值,从而使电磁转矩的出力更加平稳,转矩脉动也更小。

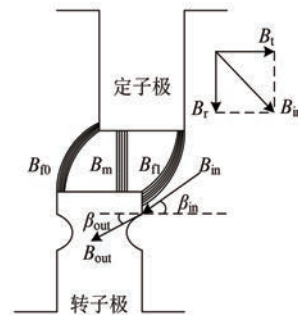


图5 转子极两侧开槽后的磁密示意图

Fig. 5 Magnetic density diagram (with slots on both sides of rotor pole)

以上是从开槽前后,气隙磁密入射角以及出射角改变的角度对气隙磁密的影响进行了定性分析。在第4节将进一步利用有限元分析定量地比较开槽前后气隙磁密的径向分量以及切向分量,并对转矩尤其是转矩相绕组换相期间的转矩情况进行定量比较,以进一步验证本节分析。

3 转子结构改进方案

第 2 节提出了在转子极两侧开槽的结构改进思路,以提高电机在转矩绕组换相期间的转矩输出。但是具体开槽形状以及开槽参数还需要做进一步的研究。本节尝试开圆弧槽,利用有限元参数化的方法,分析不同开槽参数下电机输出的转矩性能指标,以确定最终开槽尺寸。

3.1 开槽参数及性能指标

如图 6 所示,在转子极两侧对称开圆弧槽,共 2 个开槽参数,分别定义为:圆弧槽半径 r 、圆弧槽顶高度 l 。

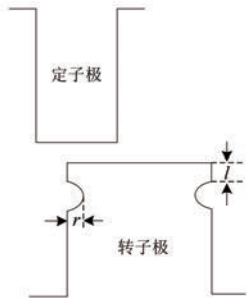


图 6 开槽参数示意图
Fig. 6 Schematic diagram of slot parameters

引入转矩脉动系数作为衡量转矩脉动大小的指标,其表达式为

$$K_{rip} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \tag{4}$$

式中: K_{rip} 为转矩脉动系数; T_{max} 、 T_{min} 、 T_{avg} 分别为电机运行时的最大、最小以及平均转矩。

由于转矩脉动能够体现转矩的平稳性,而平均转矩可以决定电机的转矩出力及动态平衡,所以将转矩脉动和平均转矩作为性能指标。

利用 Maxwell 2D 建立转子极开圆弧槽的 BSRMWR 有限元模型如图 7 所示,电机基本参数如表 1。

3.2 开槽参数确定

以 3.1 节中建立的开槽后的 BSRMWR 有限元模型为基础,对所开圆弧槽的参数进行参数化处理。依据图 3 所示工作区间示意图,三相绕组轮流作为转矩相,分别施加 12 A 的对称励磁电流,使用控制变量法分析单个开槽参数对性能指标的影响,以最优转矩性能为目标,确定圆弧槽的参数。

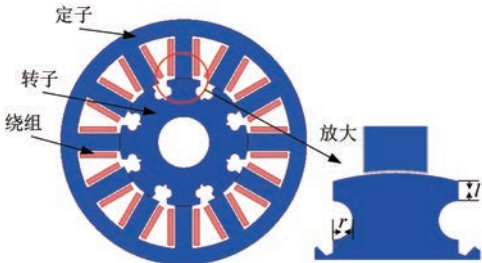


图 7 转子极开圆弧槽后电机有限元模型
Fig. 7 Finite element model of BSRMWR with circular slots on rotor poles

表 1 BSRMWR 基本参数
Tab. 1 Basic parameters of BSRMWR

参数名称	参数值
定子内径/mm	49.8
定子外径/mm	95
定子轭高/mm	6.1
转子轭高/mm	7.65
气隙/mm	0.25
铁心材料	DW360-50
转子内径/mm	20
转子外径/mm	49.3
定转子极弧/(°)	15/30
铁心长度/mm	55
线圈匝数	30

(1) 圆弧槽半径 r

设置圆弧槽顶高度 l 为 2 mm,运用 Maxwell 2D 软件进行电机瞬态场分析,得到圆弧槽半径 r 在 0.5~4 mm 范围内变化时,电机的平均转矩和转矩脉动系数随 r 变化的曲线如图 8 所示。可以看到,增大圆弧槽半径 r 时,电机的平均转矩先平稳上升后急剧下降,而转矩脉动系数先平稳下降后又急剧上升。当 r 为 3 mm 时,转矩脉动系数达到最小值 0.718 1,且也能获得较大的平均转矩 4.559 1 N·m。

(2) 圆弧槽顶高度 l

在保持圆弧槽半径 r 为 3 mm 的前提下,设定圆弧槽顶高度 l 的变化范围为 0.5~4 mm,运用 Maxwell 2D 软件进行电机瞬态场分析,得到不同圆弧槽顶高度 l 与转矩性能指标的关系,如图 9 所示。可以看到,随着圆弧槽顶高度 l 的增加,电机的平均转矩持续下降,转矩脉动系数先下降再升高。在圆弧槽顶高度 l 为 1 mm 时,转矩脉动系数达到最小值 0.668 2,且也能获得较大的平均转矩 4.765 9 N·m。

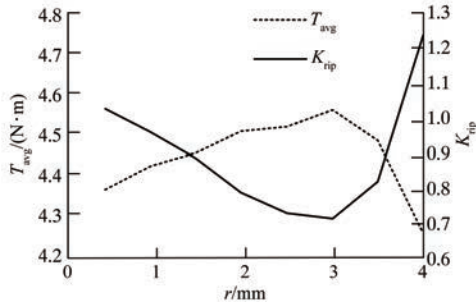


图 8 不同圆弧槽半径时的转矩性能指标

Fig. 8 Torque performance indicators with different arc slot radius

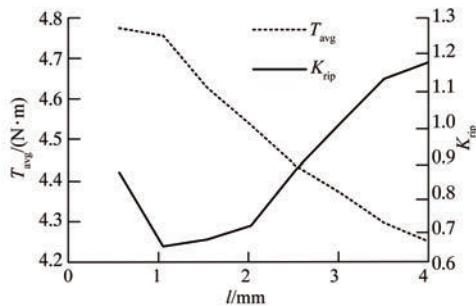


图 9 不同圆弧槽顶高度时的转矩性能指标

Fig. 9 Torque performance indicators with different height of the arc slot from the rotor pole top

综上分析,确定圆弧槽半径 r 为 3 mm、圆弧槽顶高度 l 为 1 mm 为最终开槽参数。此时,电机输出的平均转矩为 4.765 9 N·m,转矩脉动系数为 0.668 2。

注意:为了降低搜索空间的规模,本文忽略了两个开槽参数之间的耦合,先确定圆弧槽半径,再确定圆弧槽顶高度,没有考虑两个参数同时作用时对性能指标的影响,因此得到的解是次优解。若想要得到最优解,可采用全局优化算法。

4 开槽效果验证

4.1 气隙磁密

为了定量比较转子开槽前后,气隙磁密的切向分量以及径向分量的变化情况,以第 3 节中所建立的电机二维有限元模型为基础,设置初始转子位置如图 10 所示。此时转子极前沿与 A 相定子极后沿对齐,转矩相需要由 C→A 换相。在绕转子一周的气隙内添加一圈圆弧,将该圆弧上与 A 相定子极后沿相对齐的点作为圆弧起始位置。

A 相四个绕组对称励磁,励磁电流均为 5 A,进行瞬态场分析,得到转子极开槽前后的切向气

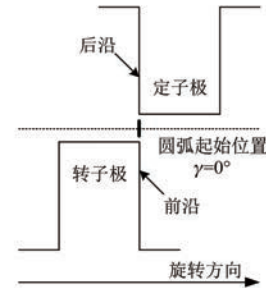


图 10 圆弧初始位置示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the initial position of the circle

隙磁密和径向气隙磁密如图 11 所示。其中,横轴代表所添加圆弧上的点与定子极径向中心的连线相对于 A 相定子极后沿的角度,称作“圆周位置角”,记作“ γ ”。

可以看出,在圆周位置角 $\gamma = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 以及 270° 附近,A 相绕组电流在气隙中产生的切向磁密明显增大,增幅约 35.9%;而径向磁密有所缩小,缩幅约 9.08%。事实上,这四个圆周位置角所在的位置正是 BSRMWR 的转矩相绕组应该由 C→A 换相的位置。类似的,在其它的转矩相绕组换相位置,也能增大切向气隙磁密,从而提高换相时的转矩值,降低转矩脉动。

4.2 转矩性能

在 Simplorer 软件中搭建三相不对称半桥型功率电路,为转矩相搭建直接瞬时转矩控制电路。由于径向悬浮力是控制转子径向悬浮的直接因素,而仿真软件无法模拟转子悬浮过程,故省略了径向位移外环,改成直接为悬浮相搭建电流斩波控制电路,以便观察一定激励电流下的悬浮力特性。然后将功率电路和控制电路与 Maxwell 中搭建的 BSRMWR 模型建立联系,形成整个电机控制系统的场路耦合仿真模型。设置初始转速为 1 000 r/min,总仿真时长为 15 ms,步长为 0.025 ms,负载转矩设为 5 N·m。经计算,转子体积约为 76.34 cm³,质量约为 584 g,自重约为 5.84 N。因此仿真时,在 y 轴负方向施加 5.84 N 的径向力负载,以模拟转子自重,经多次验算确定不对称励磁悬浮电流斩波值设为 1 A、0.86 A、0.5 A(4.3 节会详细分析)。观察该电机在动态运行过程中的转矩及径向悬浮力。

对比转子极开槽前后的输出转矩分别如图

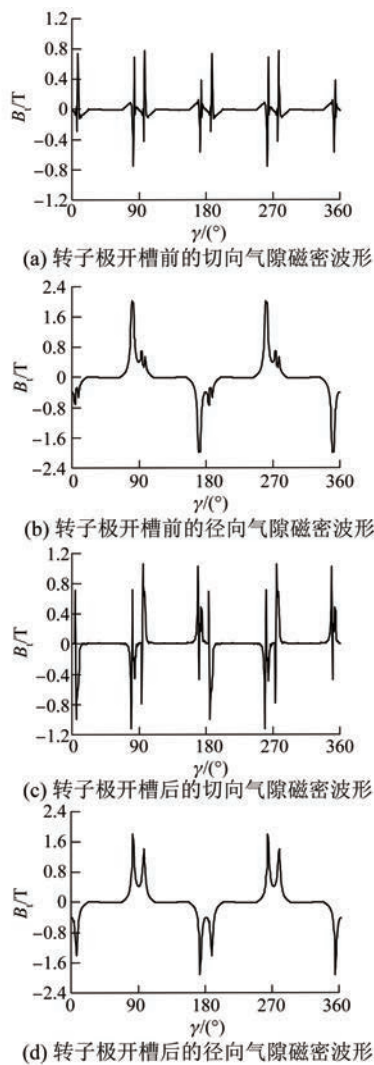


图 11 转子极开槽前后的气隙磁密切向、径向分量示意图
Fig. 11 Schematic diagram of tangential and radial magnetic density before and after rotor pole slotting

12(a)、(b)所示。可以看出相较于转子极未开槽,在转子极两侧开圆弧槽后可以有效增大转矩绕组换相期间的转矩值,从而降低转矩脉动。

表 2 为转子极开槽前后输出转矩的具体性能指标对比数据,可以看出电机输出的平均转矩由 4.368 2 N·m 升高到 4.765 9 N·m,平均转矩提升了 9.10%;转矩脉动系数由 1.080 8 降低到 0.668 2,转矩脉动系数下降了 38.18%,转矩脉动的抑制效果明显。

表 2 转矩性能指标对比

Tab. 2 Comparison of torque performance indicators		
转子极改进方式	平均转矩/(N·m)	转矩脉动系数
未开槽	4.368 2	1.080 8
两侧开圆弧槽	4.765 9	0.668 2

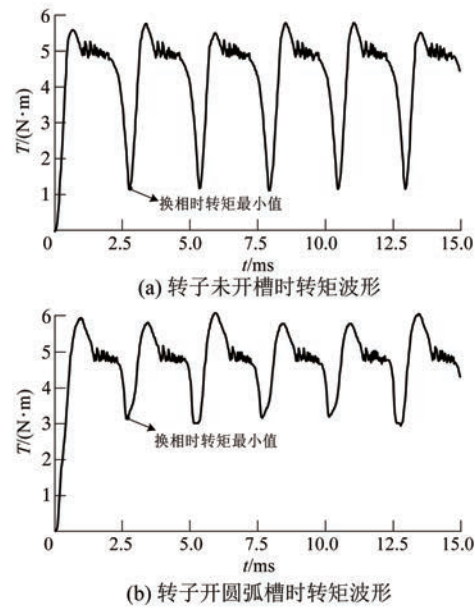


图 12 转矩脉动对比图
Fig. 12 Torque ripple comparison diagram

4.3 悬浮力性能

开槽前后,电机的悬浮力电流波形如图 13 所示。在 A 相作为转矩相时,由 A4 极绕组提供悬浮力电流,平均值为 0.993 A。在 B 相作为转矩相时,由 B3 极、B4 极绕组分别提供悬浮力电流,平均值分别为 0.863 A、0.503 A。在 C 相作为转矩相时,由 C3 极、C4 极绕组提供悬浮力电流,平均值分别为 0.511 A、0.861 A。以上绕组导通顺序以及电流值均符合要求,造成悬浮电流斩波值不同的原因是绕组空间分布的不同。

对比电机开槽前后的悬浮力,如图 14 所示。开槽前,电机 x 方向平均悬浮力为 0.186 N, y 方向悬浮力为 5.921 N;开槽后,电机 x 方向平均悬浮力为 0.112 N, y 方向悬浮力为 5.773 N。开槽前后, x 方向的平均悬浮力均远小于 y 方向的平均悬浮力,验证了可以实现良好的径向力解耦。开槽后, y 方向的平均悬浮力仅减小了 2.49%,说明对径向悬浮能力的影响非常小。因此得出结论:转子极两侧开圆弧槽后,在减小转矩脉动的同时,对悬浮力的影响很小。

5 结语

本文在分析 BSRMWR 的基本结构及双相导通解耦运行原理的基础上,针对其转矩脉动很大

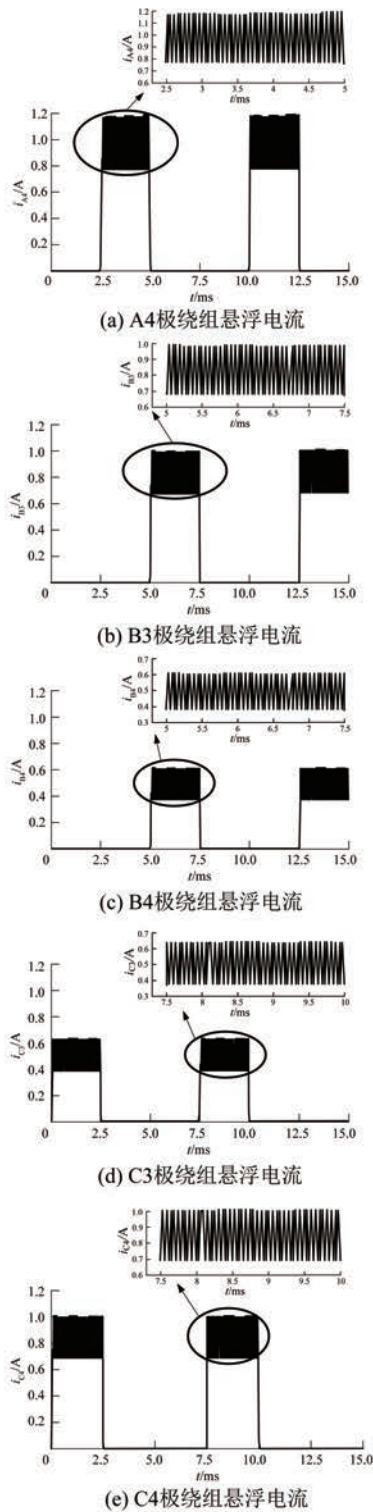


图 13 悬浮力电流波形图

Fig. 13 Suspension current waveform diagram

的问题,以电机本体结构改进为切入点,对电机转子极进行开槽优化。运用参数化扫描的方法,对比不同开槽参数对电机转矩性能指标的影响,确

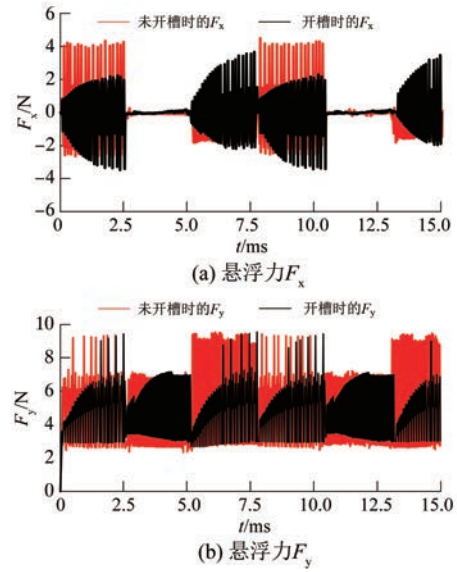


图 14 悬浮力对比图

Fig. 14 Suspension force comparison diagram

定了转子开槽参数。基于场路耦合的方法,建立了BSRMWR控制系统仿真模型,进行动态运行仿真,对比分析了转子极开槽前后的性能指标。最终得出结论:通过对电机转子极进行开槽优化,可以在有效抑制输出转矩脉动的同时提升平均转矩,与此同时径向悬浮力仅略有减小,不会对径向悬浮性能造成较大影响。

参考文献

- [1] 肖丽,董昊宇,高峰,等. 新能源汽车用新型开关磁阻电机驱动系统[J]. 电气传动, 2018, 48(7): 3-8.
- XIAO L, DONG H Y, GAO F, et al. New system of switched reluctance drive for new energy vehicles [J]. Electric Drive, 2018, 48(7): 3-8.
- [2] 徐杰,陈璞,赵婷,等. 新能源汽车的开关磁阻电机神经网络预测控制[J]. 电力电子技术, 2019, 53(4): 40-43.
- XU J, CHEN P, ZHAO T, et al. Switched reluctance motors' predictive control for electric vehicles based on neural network [J]. Power Electronics, 2019, 53(4): 40-43.
- [3] 王成敏,王爱元,姚晓东,等. 基于MEA-BP神经网络的开关磁阻电机静态电磁特性建模[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(5): 64-68.
- WANG C M, WANG A Y, YAO X D, et al. Modeling of static electromagnetic characteristics of switched reluctance motor based on MEA-BP neural

- network [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2022, 49(5): 64-68.
- [4] 蔡辉, 王辉, 李孟秋, 等. 基于预测电流控制算法的开关磁阻电机转矩脉动抑制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(16): 4899-4909+4992.
CAI H, WANG H, LI M Q, et al. Predictive current control of switched reluctance motor for torque ripples minimization [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(16): 4899-4909+4992.
- [5] 卿龙, 王惠民, 葛兴来. 一种高效率开关磁阻电机转矩脉动抑制方法[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(9): 1912-1920.
QING L, WANG H M, GE X L. A high efficiency torque ripple suppression method for switched reluctance motor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(9): 1912-1920.
- [6] 孟繁贵, 张文鹏, 刘爱民, 等. 一种抑制开关磁阻电机转矩脉动的电流控制方法[J]. *电机与控制学报*, 2022, 26(9): 49-56.
MENG F G, ZHANG W P, LIU A M, et al. Current control method to suppress SRM torque ripple [J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(9): 49-56.
- [7] 黄朝志, 黄泽众, 宋秀西, 等. 在线转矩分配函数控制开关磁阻电机策略分析[J]. *现代电子技术*, 2020, 43(5): 125-128+132.
HUANG C Z, HUANG Z Z, SONG X X, et al. Strategy analysis of switched reluctance motor controlled by on-line torque sharing function [J]. *Modern Electronics Technique*, 2020, 43(5): 125-128+132.
- [8] 林伟燚, 杨明发. 基于神经网络的开关磁阻电机直接转矩控制[J]. *电气开关*, 2020, 58(1): 17-20.
LIN W Y, YANG M F. DTC of switch reluctance motor based on neural network [J]. *Electric Switchgear*, 2020, 58(1): 17-20.
- [9] 张帅. 基于直接转矩控制与自抗扰技术的开关磁阻电机转矩脉动抑制策略[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2022.
ZHANG S. Torque ripple suppression strategy of switched reluctance motor based on direct torque control and active disturbance rejection technology [D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2022.
- [10] CHEN Y, JIANG Q, ZHAI L, et al. Direct instantaneous torque control of switched reluctance motor using adaptive excitation angle [C]//2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), Kristiansand, Norway, 2020.
- [11] 韩国强, 陆哲, 吴孟霖, 等. 基于改进滑模控制策略的开关磁阻电机直接瞬时转矩控制方法[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(22): 5740-5755.
HAN G Q, LU Z, WU M L, et al. Direct instantaneous torque control method for switched reluctance motor based on an improved sliding mode control strategy [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(22): 5740-5755.
- [12] 程勇, 曹晓晓. 基于模糊自适应 PID 的开关磁阻电机滞环-脉宽调制直接瞬时转矩控制[J]. *电机与控制应用*, 2019, 46(1): 40-47.
CHENG Y, CAO X X. Hysteresis-pulse width modulation direct instantaneous torque control of switched reluctance motor based on fuzzy adaptive PID controller [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(1): 40-47.
- [13] 薛惟栋, 曲兵妮. 抑制开关磁阻电机振动的结构设计研究[J]. *电机与控制应用*, 2021, 48(11): 39-44.
XUE W D, QU B N. Structural design of switched reluctance motor vibration suppression [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2021, 48(11): 39-44.
- [14] 黄朝志, 石王丰, 郭桂秀, 等. 基于转矩脉动和径向力的定子极形优化[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(6): 98-106.
HUANG C Z, SHI W F, GUO G X, et al. Optimization of stator pole shape based on torque ripple and radial force [J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(6): 98-106.
- [15] 陈吉清, 冼浩岚, 兰凤崇, 等. 开关磁阻电机结构性转矩脉动抑制方法[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(20): 106-119.
CHEN J Q, XIAN H L, LAN F C, et al. Structural torque ripple suppression method of switched reluctance motor [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(20): 106-119.
- [16] LIU X, WANG Z, WAN D, et al. Structure optimization of switched reluctance motor for torque ripple suppression [C]//2019 22nd Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Harbin,

- China, 2019.
- [17] 郑康凯, 张存山. 新型转子齿的高速开关磁阻电机转矩脉动抑制[J]. 微电机, 2020, 53(8): 21-26.
- ZHANG K K, ZHANG C S. Research on torque ripple reduction of high speed switched reluctance motor based on a new rotor tooth [J]. Micromotors, 2020, 53(8): 21-26.
- [18] 孔庆奕, 李艳超, 容烨, 等. 开关磁阻电动机结构参数优化设计研究[J]. 微特电机, 2018, 46(5): 28-30.
- KONG Q Y, LI Y C, RONG Y, et al. The influence of structure optimum design of switched reluctance motor [J]. Small and Special Electrical Machines, 2018, 46(5): 28-30.
- [19] 朱伟明. 单绕组宽转子齿无轴承开关磁阻电机振动噪声基础研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- ZHU W M. Basic research on vibration and noise of single winding bearingless switched reluctance motor [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [20] 苒意. 单绕组 12/8 极宽转子齿结构无轴承开关磁阻电机发电运行控制策略[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- CHANG Y. Power generation operation control strategy for 12/8 pole single-winding bearingless switched reluctance motor with wider rotor teeth [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
-
- 收稿日期:2023-07-15
收到修改稿日期:2023-09-04
作者简介:
周云红(1982-),女,博士,教授,研究方向为电力传动,404740702@qq.com;
*通信作者:李汉杰(1997-),男,硕士研究生,研究方向为开关磁阻电机优化设计及控制,1483106584@qq.com。

Optimization of Rotor Pole Shape for Bearingless Switched Reluctance Motor with Wide Rotor

ZHOU Yunhong, LI Hanjie^{*}, MENG Sijie, LIU Chenyu, TAN Zhengyi

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

Key words: wide rotor; bearingless switched reluctance motor; torque ripple suppression; optimization of rotor shape

A bearingless switched reluctance motor with wide rotor (BSRMWR) is studied in this paper. The motor structure is shown in Fig.1.

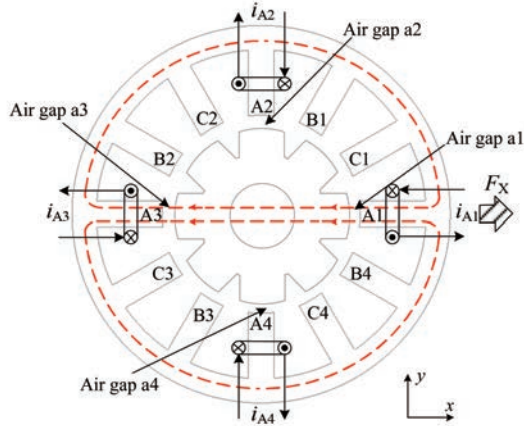


Fig. 1 Topology structure diagram of BSRMWR

Fig.2 shows the distribution curve of three phase self-inductances of BSRMWR. Due to the presence of wide rotor, the inductance curve of each phase not only has a rising zone and a dropping zone, but also has a flat zone with maximum value. When the windings of one phase work in the rising zone, positive torque will be provided to drive the rotor to rotate. When the windings of one phase work in the flat zone, suspension force will be provided to ensure the stable suspension of rotor. BSRMWR can achieve the decoupling of torque and suspension force with low control difficulty.

Similar to the switched reluctance motor (SRM), there exists severe torque ripple during winding commutation process. As shown in Fig.3, a finite element model of BSRMWR is established with Ansoft/Maxwell 2D. Note that there are circular slots on both sides of rotor poles. After the slots are parameterized, the parameterized scanning method is used to optimize the radius r and arc top height l of the circular slot with the goal of optimizing

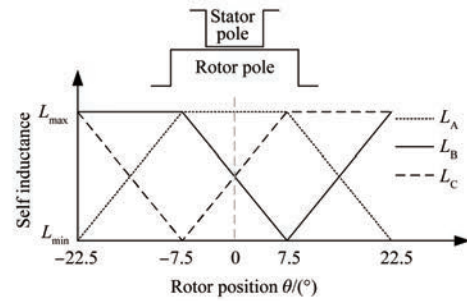


Fig. 2 Distribution curve of three phase self-inductances performance indicators.

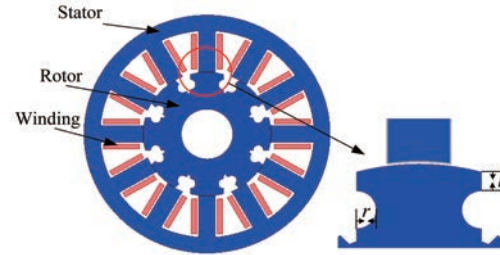


Fig. 3 Finite element model of BSRMWR with circular slots on rotor poles

By using the method of field circuit coupling, the finite element analysis model of the motor and the direct instantaneous torque control circuit model are combined to achieve the dynamic operation of the motor system. Fig.4 shows the comparison diagram of the output torque before and after the rotor poles are slotted. The simulation results show that slotting on the rotor can effectively reduce the torque ripple and improve the average torque.

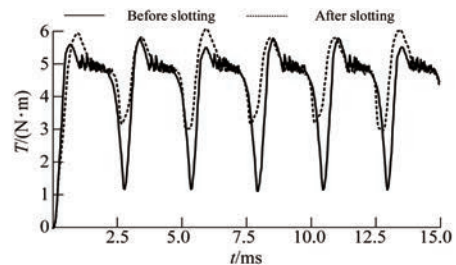


Fig. 4 Torque ripple comparison diagram