

基于定子磁障的分数槽集中绕组永磁同步电机应用设计与分析*

江景成^{1,2}, 施振川¹, 林晓刚¹, 郑庆圭¹, 解伟¹

(1. 中国科学院福建物质结构研究所, 福建 福州 350002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 分数槽集中式绕组(FSCW)存在谐波含量大的缺点,易引起定子铁心损耗和振动噪声问题,限制了其在高端领域的应用。以采用FSCW的12槽14极永磁同步电机(PMSM)为研究对象,使用有限元软件进行仿真,分析定子非绕线齿中的磁障对磁动势谐波、电磁转矩、铁心损耗及径向电磁力的影响,并传统永磁电机进行对比。仿真结果表明,采用定子磁障的电机能够有效降低绕组磁动势低次谐波,1、3、5次谐波分别下降了87%、84%和30%,铁心损耗减小了21.1%,低阶径向电磁力减小了20%以上,实现了对噪声和振动的有效抑制。

关键词: 分数槽集中式绕组(FSCW); 永磁同步电机(PMSM); 磁障; 低次谐波

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)07-0068-05

doi: 10.12177/emca.2021.038

Application Design and Analysis of FSCW PMSM Based on Stator Flux Barrier*

JIANG Jingcheng^{1,2}, SHI Zhenchuan¹, LIN Xiaogang¹, ZHENG Qinggui¹, XIE Wei¹

(1. Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The fractional slot concentrated windings (FSCWs) lead to the disadvantage of large harmonic content, which can easily cause stator and rotor core loss and vibration and noise problems, and limit the application of FSCW in high-end fields. Based on a 12-slot 14-pole permanent magnet synchronous motor (PMSM) with FSCW, the finite element software is used to simulate and analyze the effect of flux barriers in the stator non-wound teeth on magnetomotive force harmonics, electromagnetic torque, core loss and radial electromagnetic force, and compare the motors with and without stator flux barriers. The simulation results show that the motor using stator flux barriers can effectively reduce the low-order harmonics of the winding magnetomotive force. The 1st, 3rd and 5th harmonics are reduced by 87%, 84% and 30%, respectively, and the core loss is reduced by 21.1%. The lower-order radial electromagnetic force is reduced by more than 20%. The noise and vibration are effectively suppressed.

Key words: fractional slot concentrated winding (FSCW); permanent magnet synchronous motor (PMSM); flux barrier; low-order harmonic

收稿日期: 2021-03-11; 收到修改稿日期: 2021-04-29

* 基金项目: 中科院“百人计划”C类项目(2017-123)

作者简介: 江景成(1994—),男,硕士研究生,研究方向为电机本体设计。

解伟(1982—),男,研究员,博士生导师,研究方向为电动汽车主驱系统、工业伺服系统等。

0 引言

内置式永磁同步电机(IPMSM)因其高效率,高转矩密度和宽调速范围等优点,广泛应用于电动交通工具的驱动系统^[1]。近年来,分数槽集中式绕组(FSCW)在IPMSM中的应用受到越来越多的关注,与分布式绕组相比,具有绕线成本低,槽满率高,端部绕组短,铜耗低,以及效率高等诸多优势^[2-3]。此外,FSCW还具有高容错性和弱磁性能好等优点^[4]。但是,FSCW产生的定子磁场中含有丰富的空间谐波,特别是低次谐波。非工作谐波会带来局部铁心饱和、永磁体中的涡流损耗以及噪声和振动等问题,且转子散热困难,易造成永磁体退磁风险^[5-7]。上述缺点限制了集中式绕组永磁电机性能的进一步提高。

为提升集中式绕组永磁电机的性能,近年来已有大量旨在减少甚至消除低次谐波含量的研究。由于磁动势谐波是由定子绕组产生的,这些研究主要集中于绕组配置的优化。多层绕组(通常每个槽多于2层)可以减少磁动势中的低次谐波分量,从而降低转矩脉动和转子损耗,但同时也减小了工作谐波的绕组系数,并且增加了定子绕线难度^[8-9]。文献[10]采用每个线圈侧不同匝数的绕组减小低次谐波。文献[11-12]的解决方案是通过增加定子槽数并使用2套绕组,但2套定子绕组也增加了制造成本和绝缘难度。文献[13]设计了一种星-三角混合的绕组连接方式,通过改变绕组因数来降低低次谐波。

以上方法均通过改变绕组配置来减少磁动势空间谐波含量。文献[14]从铁心出发,设计了一种定子磁障的方法,使1次谐波减小70%以上,但未分析磁障对噪声振动的影响。定子铁心的径向变形是电机振动和噪声的主要原因,定子磁障的设计改变了传统电机的定子铁心结构,因此有必要分析其径向电磁力,探究对噪声振动的影响。

本文分别计算12槽14极永磁同步电机(PMSM)单、双层绕组的绕组系数,使用ANSYS Maxwell软件,运用有限元法对采用定子磁障的单层绕组12槽14极电机进行建模和电磁仿真。仿真结果表明,定子磁障设计在有效削减绕组磁动势低次谐波,减小铁心损耗21.1%的同时,

减小低阶径向电磁力密度20%以上,有利于抑制电机的振动及噪声。此外,该技术还具有其他优点,例如定子铁心模块化加工与安装,以及在磁障中加入散热导管或水道以实现高效的定子冷却^[15-17]。

1 传统12槽14极电机

1.1 绕组系数计算

采用FSCW的传统12槽14极IPMSM如图1所示,分别有单层绕组和双层绕组2种定子绕组结构,电机具体参数如表1所示。

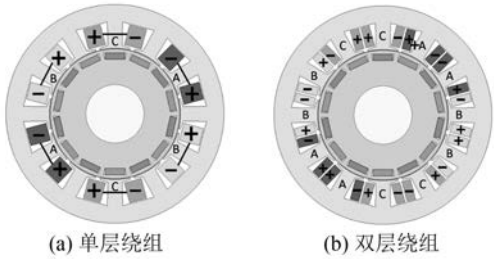


图1 传统12槽14极电机

表1 电机主要参数

参数名称	参数值
定子槽数 Q	12
极对数 p	7
相数 m	3
额定转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	1 500
额定功率 P/kW	3
额定电流幅值 I/A	30
定子外径 D_1/mm	150
转子外径 D_3/mm	89
气隙长度 δ/mm	0.5
轴向长度 L/mm	50

不同的极槽配合决定了集中式绕组的绕组布局 and 绕组系数,根据FSCW的绕组系数公式^[18]:

$$K_{wv} = K_{dv} K_{pv} \tag{1}$$

式中: K_{dv} 和 K_{pv} 分别为极对数为 v 的谐波绕组短距系数和分布系数,且 $K_{pv} = \sin\left(\frac{v\alpha y}{2}\right)$, $\alpha = \frac{2\pi}{Q}$ 为槽距角, y 为节距,对于集中式绕组, $y=1$ 。

FSCW与传统整数槽绕组的分布系数计算公式有所不同,其 v 次谐波分布系数计算公式^[19]为

$$K_{pv} = \begin{cases} \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{\frac{q_{ph}}{2}\sin\left(\frac{\alpha_{phv}}{2}\right)}, & q_{ph} \text{ 为偶数} \\ \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2m}\right)}{q_{ph}\sin\left(\frac{\alpha_{phv}}{4}\right)}, & q_{ph} \text{ 为奇数} \end{cases} \quad (2)$$

式中: q_{ph} 为单元电机的每相槽数, $q_{ph} = \frac{Q}{mt}$; t 为槽数 Q 与极对数 p 的最大公约数, 代表单元电机的个数; α_{phv} 为槽电动势星形图中相邻相量之间的电角度, $\alpha_{phv} = \frac{2\pi}{Q/t} \left(1 + \delta_{ph} \frac{v-p}{t}\right)$; $\delta_{ph} = \frac{kQ/t+1}{p/t}$, k 为使 δ_{ph} 为整数的最小整数。

根据式(1)、式(2), 可以计算得到传统 12 槽 14 极电机的单、双层绕组的 5 次、7 次谐波绕组系数, 如表 2 所示。对比可得单层绕组的绕组系数比双层绕组高了 3.3%。

表 2 绕组系数

	单层绕组	双层绕组
5 次谐波	0.965 9	0.932 9
7 次谐波	0.965 9	0.932 9

此外, 与双层绕组相比, 单层绕组具有更大的自感, 这有利于减小故障时的冲击电流, 也有利于提高弱磁能力^[20-22]。因此, 当需要高基波绕组系数和高容错能力时, 单层绕组是更好的选择, 且加工成本也更低。

1.2 磁动势谐波分析

对传统 12 槽 14 极电机的单、双层绕组磁动势谐波分别进行傅里叶分解, 并以 7 次谐波幅值为基准值进行归一化处理, 得到的结果如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 该定子绕组类型的主要空间谐波为 1、5、7、17 和 19 次谐波。

为了最大化转矩密度, 通常采用幅值最高的 5 次或 7 次谐波用作工作谐波, 即采用 10 极或 14 极转子。由于 12 槽 14 极电机的槽极数最小公倍数大于 12 槽 10 极, 因此 12 槽 10 极的齿槽转矩更大^[23]。为了减小齿槽转矩, 这里采用 14 极转子, 故只有 7 次谐波才能与永磁体磁场相互作用, 产生连续转矩。其他阶次的谐波, 尤其是

1、5、17 等具有较大幅度的谐波, 对转矩输出没有贡献, 只能带来额外的转子损耗, 并引起噪声和振动问题。

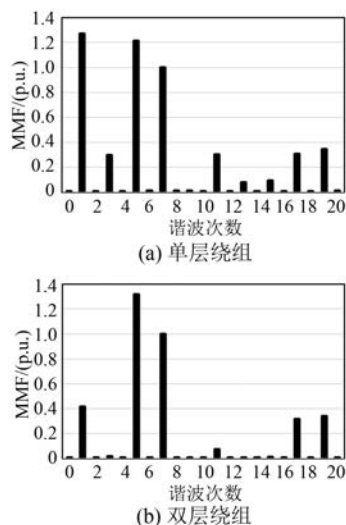


图 2 传统 12 槽 14 极电机磁动势分析

2 定子磁障设计

12 槽 14 极电机采用单层绕组时, 具有高基波绕组系数、高容错能力和低加工成本等优点, 但低次谐波含量丰富, 其中 1 次谐波幅值较高。

对于 12 槽 14 极单层绕组电机, 通过在定子铁心上的非绕线齿中开槽, 用磁导率较小的材料作为“T 型”定子磁障进行填充, 从而减小 1 次谐波磁通。定子磁障通过在定子铁心非绕线齿中开槽, 并加入低磁导率材料, 改变定子铁心结构, 形成磁障, 增大低次谐波的磁路磁阻, 实现对低次谐波的抑制。磁障轴线与定子齿轴线重合, 宽度小于定子齿宽, 磁障定子外圆一侧比内圆一侧略宽, 便于在铁心中固定装备, 因此为“T 型”。当其宽度占齿宽 20% ~ 50% 时, 对谐波的抑制及基波的提升效果最佳^[24]。

定子磁障效果如图 3 所示, 定子磁障的设计为分块定子的加工带来便利。另外, 也可以考虑在定子磁障中加入液冷导管等冷却设计, 不需要额外的独立于电机本身的散热部件, 有利于减小电机的体积, 增大功率密度。

3 有限元分析

利用 ANSYS Maxwell 仿真软件对加入定子磁

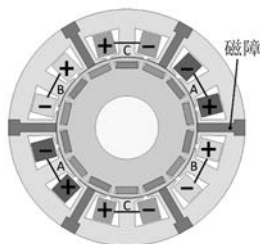


图3 定子磁障效果图

障后的12槽14极单层绕组电机进行有限元建模,为了对比控制变量,建模参数采用与表1中传统电机相同的数值。

3.1 绕组磁动势分析

做以下理想假设以简化分析:(1)电流集中于槽中心线;(2)气隙均匀;(3)忽略磁饱和。

当通入幅值 $I=30\text{ A}$, 频率为 175 Hz 的正弦交流电流时,计算传统型与定子磁障型12槽14极单层绕组电机的气隙磁密,并进行傅里叶分解,得到的结果如图4所示。

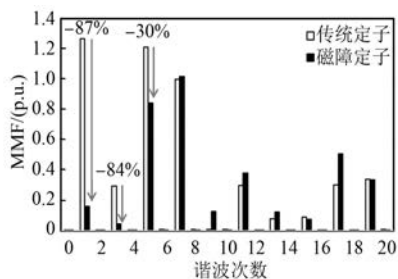


图4 磁动势对比图

1次谐波下降了87%,3次谐波下降了84%,5次谐波下降了30%,而7次工作谐波幅值提高了2%。因此,定子磁障设计能有效抑制低次谐波的含量,有利于减小铁心损耗,另外工作谐波也稍有提升。

3.2 电磁转矩分析

在幅值 $I=30\text{ A}$, 频率为 175 Hz 的正弦交流电流激励下,对比传统电机与定子磁障型12槽14极电机的电磁转矩,结果如图5所示。平均电磁转矩均为 $3.4\text{ N}\cdot\text{m}$,几乎不变,转矩脉动降低6%。

3.3 铁心损耗分析

在同样的定子电流激励下,分别对比传统与定子磁障型12槽14极电机的定子及转子铁心损

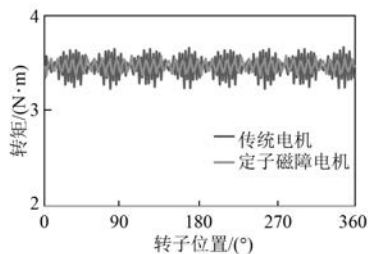


图5 电磁转矩对比图

耗,结果如图6所示。定子铁损减小了19.7%,转子铁损减小了31.3%,铁心损耗共减小了21.1%。

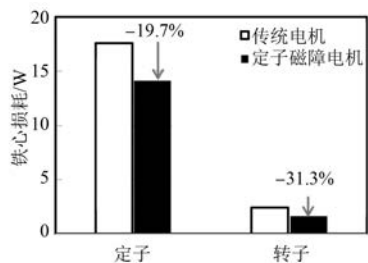


图6 铁心损耗对比图

3.4 径向电磁力分析

电磁噪声是电机主要振动噪声源,由气隙磁场中各次谐波作用于铁心产生的径向电磁力所造成。如果电磁力的某些阶次谐波频率与电机的固有频率相近,则会产生共振,从而产生较大的振动和噪声,甚至损坏电机。一般情况下,转子刚度相对较强,定子铁心的径向变形是振动和噪声的主要来源。定子铁心在低阶径向电磁力的作用下,发生形变,引起周围空气振动,从而产生噪声^[25]。定子磁障设计改变了传统12槽14极电机定子铁心的结构,因此有必要研究其径向电磁力,探究新结构对噪声振动的影响。利用仿真得到的气隙磁密,根据麦克斯韦应力张量法,计算出径向电磁力密度:

$$f_{\text{rad}}(\theta_s, t) = \frac{1}{2\mu_0} [B_r^2(\theta_s, t) - B_\theta^2(\theta_s, t)] \quad (3)$$

得到的结果及傅里叶分解后的结果如图7所示,径向电磁力密度主要为偶数次谐波,定子磁障型电机比传统电机,低阶径向力除4次谐波略有增加,其余全部减小,0、2、6、8次谐波分别减小了20.4%、58.2%、20.6%和71.5%。由于电机的电磁噪声主要由低阶的径向电磁力产生,新的结构能有效降低电磁噪声及振动。

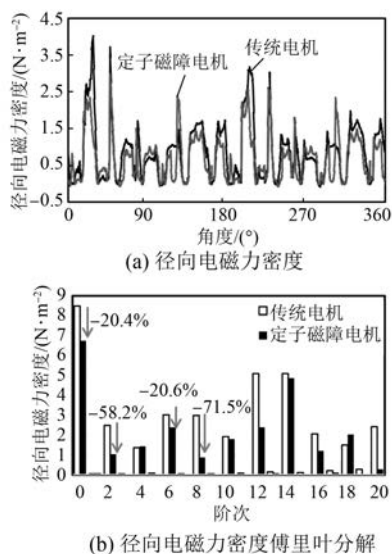


图7 径向电磁力密度对比图

4 结 语

本文针对一款12槽14极单层绕组PMSM,存在绕组磁动势低次谐波含量高的问题,研究其在定子非绕线齿中加入磁障的方法,以达到降低低次谐波,减小铁心损耗及优化噪声和振动的目的。仿真结果显示,定子磁障结构对低次谐波的抑制效果明显,1、3、5次谐波分别下降了87%、84%和30%,转矩脉动减小了6%,铁心损耗减小了21.1%。此外,定子磁障还减小了低阶径向电磁力密度20%以上,有利于抑制电机的振动及噪声。

【参考文献】

- [1] 陈羽. 内置式永磁同步电机设计与分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [2] REDDYP B, EL-REFAIE A M, HUH K K, et al. Comparison of interior and surface PM machines equipped with fractional-slot concentrated windings for hybrid traction applications [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(3): 593.
- [3] DUTTA R, CHONG L, RAHMAN M F, et al. Design and experimental verification of an 18-slot/14-pole fractional-slot concentrated winding interior permanent magnet machine [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(1): 181.
- [4] EL-REFAIE A M. Fractional-slot concentrated-windings synchronous permanent magnet machine: opportunities and challenges [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 107.
- [5] NAIR S S, PATEL V I, WANG J. Post-demagnetization performance assessment for interior permanent magnet AC machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(4): 8102810.
- [6] DU G, XU W, ZHU J, et al. Power loss and thermal analysis for high-power high-speed permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 2722.
- [7] CHOI G, ZHANG Y, JAHNS T M. Experimental verification of rotor demagnetization in a fractional-slot concentrated-winding PM synchronous machine under drive fault conditions [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(4): 3467.
- [8] FARNASIERO E, ALBERTI L, BIANCHI N, et al. Considerations on selecting fractional-slot windings [C] // 2010 IEEE Energy Conversion Congress & Exposition (IECCE), 2010.
- [9] CISTELECAN M V, FERREIRA F, POPESCU M. Three-phase tooth-concentrated interspersed windings with low space harmonic content [C] // 2010 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2010.
- [10] DAJAKU G, GERLING D. Eddy current loss minimization in rotor magnets of PM machines using high-efficiency 12-teeth/10-poles winding topology [C] // 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011.
- [11] DAJAKU G, GERLING D. A novel 24-slots/10-poles winding topology for electric machines [C] // 2011 IEEE Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011.
- [12] DAJAKU G, GERLING D. A novel tooth concentrated winding with low space harmonic content [C] // 2013 IEEE Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013.
- [13] DAJAKU G, HOFMANN H, HETEMI F, et al. Comparison of two different IPM traction machines with concentrated winding [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4137.
- [14] DAJAKU G, GERLING D. Low costs and high-efficiency electric machines [C] // 2012 2nd International Electric Drives Production Conference (EDPC), 2012.

(下转第83页)