

基于软磁复合材料的超高速永磁同步电机 电磁设计分析*

韦福东, 王建辉, 刘朋鹏

[上海电器科学研究所(集团)有限公司, 上海 200063]

摘要: 软磁复合(SMC)材料因其材料特性及微观结构特点,具有涡流损耗系数低、各向同性等优点,适用于超高速永磁同步电机(PMSM)设计,可以有效降低电机铁耗。以1台额定转速4 000 r/min、额定频率533.33 Hz的PMSM为例,从电磁特性、铁耗分析计算等角度对SMC材料及硅钢片进行对比分析及有限元仿真计算,通过样机试验验证SMC材料分析结果的有效性。利用该分析方法,以1台采用SMC材料的120 000 r/min的超高速PMSM为例,对比分析不同极槽配合对电磁性能的影响,对SMC材料应用于超高速PMSM提供一定的指导。

关键词: 超高速永磁同步电机; 软磁复合材料; 铁耗分析

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)01-0078-05

doi: 10.12177/emca.2020.171

Electromagnetic Design and Analysis of Ultra-High-Speed Motor Based on Soft Magnetic Composite Material*

WEI Fudong, WANG Jianhui, LIU Pengpeng

[Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China]

Abstract: Due to its material characteristics and microstructure, soft magnetic composite (SMC) material has the advantages of low eddy current loss coefficient, isotropy and so on. It is suitable for the design of ultra-high-speed permanent magnet synchronous motor (PMSM), which can effectively reduce the motor iron loss. Taking a PMSM with a rotation speed of 4 000 r/min and a frequency of 533.33 Hz as an example, the comparison analysis and finite element simulation calculation of SMC materials and silicon steel sheets are carried out from the aspects of electromagnetic properties and iron loss analysis. The validity of SMC material analysis results is verified by prototype test. The analytical method is used and a 120 000 r/min ultra-high-speed PMSM using SMC material is taken as an example to compare and analyze the influence of different pole and slot matching on electromagnetic performance. It provides certain guidance for the application of SMC materials to ultra-high-speed PMSM.

Key words: ultra-high-speed permanent magnet synchronous motor (PMSM); soft magnetic composite material; analysis of iron loss

0 引言

超高速电机因其具有转动惯量小,可以直接

驱动高速负载等优点,广泛应用于高速空气压缩机、高速磨床、航空航天等高端制造设备^[1]。但是因为其转子转速高,所以电机额定频率也远高于

收稿日期: 2020-10-09; 收到修改稿日期: 2020-10-29

* 基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2019B090909002)

作者简介: 韦福东(1992—),男,硕士,研究方向为电机设计与控制技术。

王建辉(1971—),男,博士,副教授,研究方向为电机设计与控制技术。

刘朋鹏(1990—),男,硕士,研究方向为电机设计与控制技术。

普通电机,导致电机损耗较大^[2]。对于超高速电机来说,合理选择定子铁心材料可以有效降低电机定子铁耗。

软磁复合(SMC)材料是一种新型不规则铁基金属粉末材料,微粒直径通常约为 0.1 mm,通过表面喷裹无机绝缘层,有效降低材料的涡流损耗^[3-4]。与传统硅钢片材料相比,SMC 材料具有良好的可塑性,使研制复杂定子铁心形状成为可能。通过调整 SMC 粉末混合物成分,可以使铁心材料表现出不同的损耗特性和机械强度^[4]。

由于 SMC 材料具有磁热各向同性,材料利用率高等优点,已在轴向磁通电机等多种特种电机中取得应用。吴巧变^[5]将 SMC 材料应用到横向磁通永磁无刷电机中,降低了漏磁和转矩脉动;刘成成^[6]提出一种 SMC 材料铁心永磁电机新型拓扑结构,对 SMC 材料铁心爪极电机和横向磁通电机的齿槽转矩抑制进行了研究。王晓光等^[7]对基于 SMC 材料的轴向磁通永磁电机进行设计和分析,利用 SMC 材料的加工特点对电机结构进行优化,以弥补 SMC 材料磁导率低的缺点。黄平林等^[8]对定子铁心采用 SMC 材料、转子采用 Halbach 磁路的 6 000 r/min 永磁同步电机(PMSM)进行设计优化,验证 SMC 材料应用的可行性及 Halbach 阵列可有效增强气隙磁密、屏蔽漏磁的功能。郑沛^[9]从不同极槽配合、套筒结构等方面对高速 PMSM 的进行对比分析,优化了电机电磁性能。

本文利用有限元法分析对比 SMC 材料和硅钢片材料的电磁特性,从磁滞损耗、涡流损耗及附加损耗角度对不同铁磁材料的电机铁耗进行对比分析,并以 1 台 4 000 r/min 的 SMC 材料 PMSM 为例,通过样机试验验证了该方法可以较为准确地反映电机实际铁耗情况。最后,提出 1 台定子铁心采用 SMC 材料的 120 000 r/min 超高速 PMSM 设计方案,对比 12 槽 2 极、18 槽 2 极 2 种极槽配对电机电磁性能的影响,为超高速 PMSM 电磁设计提供一定的指导。

1 电磁特性对比

铁磁材料的导磁能力是表征铁磁材料的一项重要参数,可以用磁导率来表示:

$$\mu_r = \frac{B}{H} \cdot \frac{1}{\mu_0} \quad (1)$$

式中: B 为磁通密度幅值; μ_0 为真空磁导率。

由于铁基粉末外的绝缘材料不导磁,SMC 材料的磁导率在磁密较小时,仅约为硅钢片材料的 5%,随磁密增加,SMC 材料的磁导率逐渐增大,但是依然低于硅钢片材料。赫格纳斯(中国)有限公司生产的 700HR-5P-SMC 材料与宝武钢铁生产的 B20AV1300、50WW350 硅钢片的磁化曲线对比如图 1 所示。

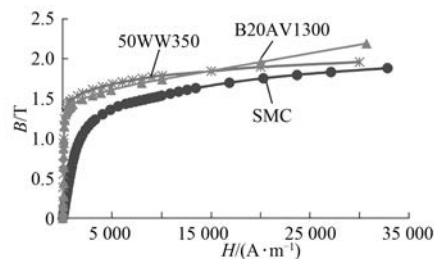


图 1 SMC 与硅钢片磁化曲线对比

由图 1 可知,SMC 材料 BH 曲线的拐点约为 1 T,饱和点仅为 1.6 T,明显低于 B20AV1300、50WW350 硅钢片材料的拐点和饱和点。因此,在相同的励磁情况下,SMC 材料的磁密要低于硅钢片材料。

2 定子铁耗分析

超高速电机铁耗主要包含磁滞损耗、涡流损耗和附加损耗,Bertotti 铁耗计算模型如下:

$$P_{Fe} = P_h + P_e + P_a = k_h f B^a + k_e f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} \quad (2)$$

式中: P_h 为磁滞损耗; P_e 为涡流损耗; P_a 为附加损耗; k_h 、 a 为磁滞损耗系数; k_e 为涡流损耗系数; k_a 为附加损耗系数; f 为频率。

磁滞损耗 P_h 是指铁磁材料在交变磁场中被反复磁化,磁畴不断旋转并相互摩擦所消耗的能量。磁滞损耗的大小与材料的磁滞回线所包围的面积大小成正比,磁场频率升高,矫顽力 H_c 增大,使磁滞回线变宽,磁滞损耗随之增大。通常情况下,颗粒尺寸越小,磁滞损耗越大^[10]。由于 SMC 材料特殊的微观结构特点,与硅钢材料相比,SMC 材料的磁滞损耗更大。

涡流损耗 P_e 是由于铁磁材料在交变磁场中

产生感生电流引起的损耗。传统电机通常采用彼此绝缘的硅钢片叠压而成,来降低涡流损耗。涡流损耗系数可以表示为

$$k_c = \frac{\pi^2}{6\rho\rho_{Fe}}d^2 \tag{3}$$

式中: ρ 为铁心材料电阻率; ρ_{Fe} 为铁心材料密度; d 为单位铁心材料厚度。

由式(3)可知,电机铁心涡流损耗系数与铁心材料密度、铁心材料电阻率成反比,与单位铁心材料厚度成正比。因此,可以通过增大铁心材料电阻率、降低单位铁心材料厚度来减小电机的涡流损耗。

与硅钢片相比,SMC 材料由于颗粒微小且表面存在绝缘层,可以大大增加各方向的电阻率,有效降低铁磁材料微观涡流及宏观涡流损耗的产生,从而降低涡流损耗。因此,虽然 SMC 材料的磁滞损耗系数相对较大,但是涡流损耗系数远远小于硅钢片材料。

由式(2)的 Bertotti 铁耗计算模型可知,电机的磁滞损耗与频率成正比,而涡流损耗与频率的平方成正比。当电机频率升高,单位质量的铁耗也会随之增大,且涡流损耗增长更快。超高速电机的额定频率通常为数百赫兹,甚至上千赫兹,电机铁耗占总损耗的比例较大,因此 SMC 材料因其涡流损耗系数小更具优势,可以有效降低铁耗,提高电机效率,减小电机温升。

3 有限元仿真及样机验证

3.1 有限元仿真

为了研究对比 SMC 材料对电机铁耗的影响,本文提出了定子铁心分别采用 700HR-5P-SMC 材料及 B20AV1300、50WW350 硅钢片的 PMSM 设计方案。各方案的转子铁心均采用 50WW350 硅钢片,仅从电磁设计角度出发,对比不同铁心材料对电机铁耗的影响。主要设计参数均如表 1 所示。

表 1 PMSM 主要设计参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/W	1 100	额定转速/(r·min ⁻¹)	4 000
额定电压/V	380	额定频率/Hz	533.33
极数	16	槽数	18
最大功率/W	2 200	最大转速/(r·min ⁻¹)	4 000

根据表 1 的电机主要设计参数,建立 18 槽 16 极 PMSM 有限元仿真分析模型,如图 2 所示。

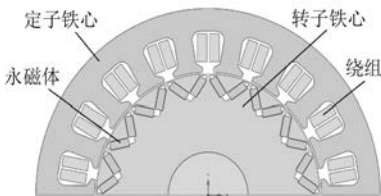


图 2 18 槽 16 极 PMSM 有限元仿真模型

根据产品型谱所提供的铁耗系数或 BP 曲线,乘以电机设计经验系数后,700HR-5P-SMC 材料、B20AV1300、50WW350 硅钢片的磁滞损耗系数、涡流损耗系数及附加损耗系数如表 2 所示。

表 2 SMC 材料及硅钢片材料铁耗系数对比

复合材料	700HR-5P-SMC	B20AV1300	50WW350
磁滞损耗系数	0.125 9	0.038 0	0.033 7
涡流损耗系数	5.72×10 ⁻⁶	4.75×10 ⁻⁵	2.39×10 ⁻⁴
附加损耗系数	3.21×10 ⁻³	3.79×10 ⁻⁴	—

通过有限元仿真分析,得到不同频率时,电机的铁耗曲线如图 3 所示。

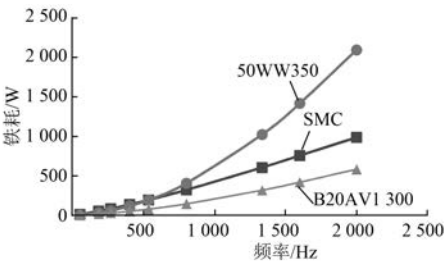


图 3 不同定子铁心材料电机铁耗对比

由图 3 可知,B20AV1300 在全频率范围内具有铁耗优势;低频时,50WW350 硅钢片的铁耗低于 700HR-5P-SMC 材料;电机运行在额定转速时,700HR-5P-SMC 定子铁心设计方案的铁耗为 196.59 W,50WW350 硅钢片定子铁心设计方案的铁耗为 197.34 W,SMC 材料的铁耗开始低于 50WW350 硅钢片材料的铁耗。当频率为 2 000 Hz 时,SMC 材料方案的铁耗为 989.73 W,50WW350 方案的铁耗为 2 098.62 W。可知,高频时 B20AV1300 铁耗最低,700HR-5P-SMC 其次,具有进一步改进和研究的价值。

3.2 样机验证

根据有限元仿真结果,对定子铁心采用 700HR-5P-SMC 材料的 18 槽 16 极 PMSM 进行样机试制,通过进行额定转速以内的空载试验,测得并分析计算电机铁耗值,以验证有限元法分析的准确性。SMC 材料样机定子铁心及试验如图 4、图 5 所示。



图 4 样机 SMC 定子铁心

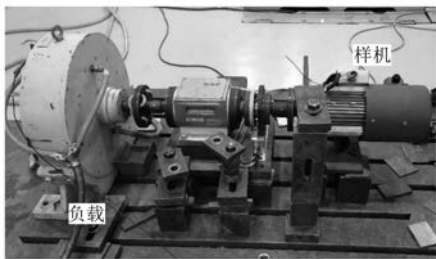


图 5 样机试验

将样机试验结果与有限元法求得的铁耗数值进行对比分析,如表 3 所示。

表 3 样机试验数据对比

频率/Hz	转速/ (r · min ⁻¹)	铁耗/W	
		有限元仿真	样机试验
50.00	375.0	12.87	17.10
181.81	1 363.6	54.62	59.06
266.67	2 000.0	85.41	87.35
400.00	3 000.0	138.61	138.31
533.33	4 000.0	196.59	191.27

由表 3 可知,有限元仿真法与样机试验结果基本相近,证明该数值算法可以较为准确地计算 SMC 电机铁耗。

4 超高速 PMSM 方案对比

根据以上研究结果,提出一种 120 000 r/min 的超高速 PMSM,该电机的定子铁心采用 SMC 材

料,转子采用 N38UH 永磁体实心轴外加合金钢护套的设计方案,对比 12 槽 2 极、18 槽 2 极 2 种极槽配合对电机电磁性能的影响。电机主要设计参数如表 4 所示。为了保证方案对比合理有效,通过调整绕组每槽导体数、匝数和线径,保持电机电负荷和槽满率基本一致。

表 4 超高速 PMSM 主要设计参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/W	10 000	额定转速/(r · min ⁻¹)	120 000
极数	2	额定频率/Hz	2 000
定子外径/mm	80	定子内径/mm	24
气隙长度/mm	3	铁心长/mm	50

根据表 4 的电机主要设计参数,建立超高速 PMSM 有限元仿真分析模型,通过仿真分析得到电机空载磁密如图 6 所示。

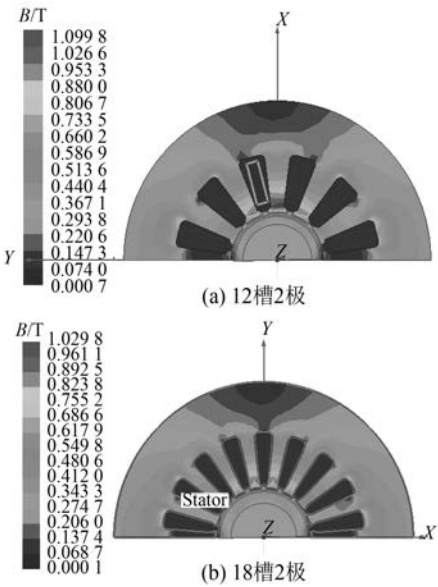


图 6 超高速 PMSM 磁密图

由图 6 可知,空载情况下,2 种方案超高速 PMSM 的齿磁密基本一致。通过有限元仿真分析得到气隙磁密波形如图 7 所示。2 种方案的定子槽数不同,受槽口因素影响,18 槽 2 极方案的气隙磁通密度波动略小于 12 槽 2 极。

为了对比相同铁心材料下不同极槽配合对电机性能的影响,通过傅里叶分解对 12 槽 2 极和 18 槽 2 极的 SMC 材料方案的气隙磁密对比分析,得到各阶谐波分量如图 8 所示。

利用短距绕组削弱谐波电动势的方法,12 槽

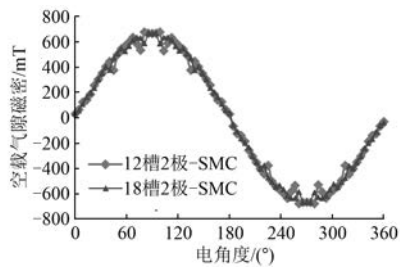


图7 空载气隙磁密对比波形图

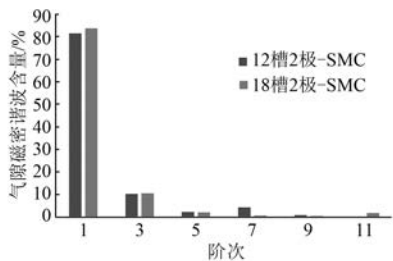


图8 气隙磁密谐波含量对比

2 极方案采用节距 $\tau=5$ 的设计,18 槽 2 极方案采用节距 $\tau=8$ 的设计。由图 8 可知,18 槽 2 极方案有效降低了 7、9 次谐波,正弦度更好。

各方案的空载反电动势、转矩波动、损耗及效率仿真分析结果如表 5 所示。

表 5 仿真结果对比		
参数名称	12 槽 2 极	18 槽 2 极
空载反电动势/V	169.05	169.75
转矩波动/%	0.15	0.15
电负荷/(A·mm ⁻¹)	45.04	45.64
定子铁耗/W	251.47	174.51
转子涡流损耗/W	24.54	8.22
铜耗/W	106.01	58.60
效率/%	96.33	97.64

由表 5 可知,与 12 槽 2 极方案相比,通过调整电机匝数,保持 18 槽 2 极方案的空载反电动势基本不变,相同力矩下,铜耗下降约 40%,铁耗下降约 30.6%,效率提高约 1.31%,优化效果较为明显。

5 结 语

本文通过对 1 台 4 000 r/min PMSM 进行有限元仿真,对比分析了不同定子铁心材料对电机的铁耗差异,通过样机验证了铁耗分析的准确性;并以 1 台 120 000 r/min 超高速 PMSM 为例,对比不同极槽配合下电机性能差异,得出以下结论:

- (1) 在磁密较小时,SMC 材料的磁导率明显低于硅钢片材料,BH 曲线的拐点也低于硅钢片材料,在相同的励磁情况下,SMC 材料的磁密要低于硅钢片材料。
- (2) SMC 材料的磁滞损耗系数相对较大,但是涡流损耗系数远小于 50WW350 及 B20AV1300 硅钢片。与 50WW350 相比,SMC 材料在高频时的铁耗优势较为明显。但是与 B20AV1300 硅钢片相比,SMC 材料的铁耗较高,还有较大的优化空间。
- (3) 通过样机试验验证可知,本文所提到的铁耗分析过程较为准确,为 SMC 材料电机铁耗分析提供了一种有效的方法。
- (4) 通过有限元仿真分析可知,采用 18 槽 2 极超高速 PMSM 的空载气隙磁密更接近正弦波、各次谐波含量低、铜耗和铁耗也有较大降低,电磁性能更优异,为采用 SMC 材料的超高速 PMSM 设计及铁耗计算提供一定的指导。

【参 考 文 献】

[1] 李盛雄. 高速永磁电机铁耗的计算与分析[D]. 武汉:中国舰船研究院,2014.

[2] 张萌. 高速 PMSM 的设计分析[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2019.

[3] 赵国新,孔德财,高晓林. 软磁复合材料与硅钢片材料的永磁电机性能差异研究[J]. 电工技术学报,2018,33(增刊 1):75.

[4] 王冰冰. 基于软磁复合材料的电动车用永磁无刷电机研究[D]. 济南:山东大学,2018.

[5] 吴巧变. 基于软磁复合材料的盘式横向磁通永磁无刷电机研究[D]. 济南:山东大学,2017.

[6] 刘成成. 软磁复合材料铁芯永磁电机新型拓扑结构及优化设计研究[D]. 天津:河北工业大学,2015.

[7] 王晓光,周晟,刘凌云,等. 基于软磁复合材料的轴向磁通永磁电机设计与分析[J]. 微电机,2020,53(3):20.

[8] 黄平林,施慧明. 基于 SMC 材料和 Halbach 磁路的电机设计与优化[J]. 微特电机,2016,44(9):11.

[9] 郑沛. 高效风机用高速永磁电机设计与分析[D]. 武汉:华中科技大学,2017.

[10] 张旭,浦杨阳,李旺昌,等. 电机中金属软磁复合材料损耗研究进展[J]. 磁性材料及器件,2020,37(8):582.