

少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机性能和材料成本研究

李宗耀, 初秋, 车爽, 李春艳*

(黑龙江大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

Research on Performance and Material Cost of Halbach Permanent Magnet Synchronous Motor with Less Rare Earth Combined Magnet Poles

LI Zongyao, CHU Qiu, CHE Shuang, LI Chunyan*

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: The rare earth permanent magnet synchronous motor (PMSM) has superior performance, but the high price of rare earth permanent magnet material leads to the increase of motor cost. A new type of permanent magnet synchronous motor with less rare earth is presented, and the permanent magnet is of the combined magnet poles Halbach structure. The structural characteristics of the less rare earth combined pole permanent magnet synchronous motor are analyzed, and on this basis, three kinds of combined magnet poles Halbach permanent magnet synchronous motor topology structures of T-type, HAT type and LREH type are proposed. Three less rare earth permanent magnet synchronous motors are analyzed in terms of no-load back electromotive force, no-load cogging torque and rated load electromagnetic torque and compared with rare-earth permanent magnet synchronous motors. The effect of the thickness of NdFeB and ferrite permanent magnets on the material cost of less rare earth permanent magnet synchronous motor with combined magnet poles is studied under equal torque conditions. The material costs of rare earth permanent magnet synchronous motor and three kinds of less rare earth permanent magnet synchronous motor is compared. Finite element simulation results show that LREH type less rare earth combined pole Halbach permanent magnet synchronous motor has better torque performance and lower material cost.

Key words: less rare earth permanent magnet synchronous motor; combined magnet poles Halbach array; electromagnetic

torque; material cost

摘 要: 稀土永磁同步电机性能优越,但稀土永磁材料价格昂贵导致电机成本增加。因此,提出了一种新型少稀土永磁同步电机,其永磁体采用组合磁极 Halbach 结构。分析了少稀土组合磁极永磁同步电机的结构特点,并在此基础上,提出了少稀土 T 型、HAT 型和 LREH 型三种组合磁极 Halbach 永磁同步电机拓扑结构。从电机空载反电动势、空载齿槽转矩和额定负载电磁转矩等方面分析了三种拓扑结构少稀土永磁同步电机,并与稀土永磁同步电机进行对比分析。在等转矩条件下研究了钕铁硼和铁氧体两种永磁体厚度对少稀土组合磁极永磁同步电机材料成本的影响。对比分析了稀土永磁同步电机和三种少稀土永磁同步电机的材料成本。有限元仿真结果表明 LREH 型少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机具有更好的转矩性能和更低的材料成本。

关键词: 少稀土永磁同步电机; 组合磁极 Halbach 阵列; 电磁转矩; 材料成本

0 引言

稀土永磁同步电机(PMSM)性能优越,在各行各业获得广泛的研究和应用^[1-3]。稀土永磁材料的剩磁高、矫顽力强且磁能积大,使其成为永磁同步电机所需的关键材料之一^[4-6]。近年来,我国针对稀土行业颁布了一系列政策,对稀土资源的开发、出口和监管等方面进行了规范,以促进其可持续发展。这些政策的实施导致市场上稀土资源的供需失衡,稀土永磁材料价格大幅度上升^[7-9],增加了生产稀土永磁同步电机的材料成本。为了在不影响永磁同步电机性能的条件下减少稀土

基金项目: 黑龙江省自然科学基金联合引导项目 (LH2023E107)

Heilongjiang Natural Science Foundation Joint Guidance Project (LH2023E107)

永磁材料的用量,少稀土永磁同步电机应运而生,并引起了国内外诸多专家学者的兴趣及持续关注^[10-12]。

少稀土永磁同步电机替代稀土永磁同步电机的前提条件是降低对稀土永磁材料依赖的同时又能达到和稀土永磁同步电机相同或相近的电磁转矩性能。对少稀土永磁同步电机的研究大多数集中在降低稀土永磁材料用量以及提高电磁转矩性能两方面^[13]。例如,文献[14]提出一种稀土钕铁硼与非稀土铁氧体串、并联相结合的少稀土永磁电机结构,既能降低电机的生产成本又可保证较高的转矩性能;文献[15]提出采用磁钢分层结构,通过优化结构参数实现电磁转矩和磁阻转矩的最优搭配来达到减少稀土永磁用量的目的;文献[16]提出的多层磁障式少稀土永磁同步电机采用多层磁障的转子结构,能够充分利用磁阻转矩,降低稀土永磁体的用量。可见,少稀土永磁同步电机是当前永磁同步电机的研究热点之一,其对降低电机材料成本以及减少对稀土永磁材料的过度依赖具有重要的研究意义^[17-18]。

本文提出了一种少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机。首先,研究少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机拓扑结构,对少稀土 T 型、HAT 型和 LREH 型三种组合磁极 Halbach 永磁同步电机的结构及性能进行对比分析。其次,研究等转矩条件下组合磁极中永磁材料及厚度对电机材料成本的影响。并对不同拓扑结构的少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机材料成本进行计算和比较。最后,通过理论分析和仿真计算验证少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机分析设计的正确性。

1 少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机结构

1.1 稀土 Halbach 永磁同步电机结构

采用 Halbach 阵列结构充磁的永磁体具有单边的聚磁特性,能够获得较大的气隙磁通密度^[19-21]。采用稀土永磁材料的 Halbach 永磁同步电机典型结构如图 1 所示。

1.2 少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机结构

少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机在结

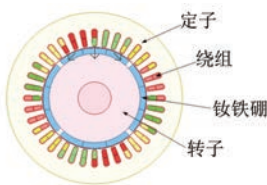


图 1 稀土 Halbach 永磁同步电机

Fig. 1 Rare earth Halbach PMSM

构上能有效减少稀土永磁材料的用量,降低电机材料成本。同时永磁体采用 Halbach 结构及组合磁极的方法提高了电磁转矩性能。少稀土 T 型、HAT 型和 LREH 型三种组合磁极 Halbach 永磁同步电机结构如图 2 所示。

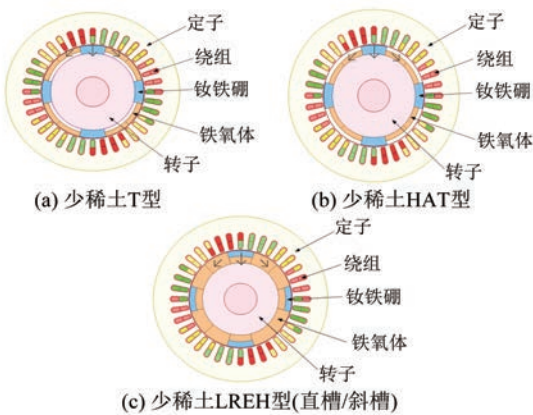


图 2 三种少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机

Fig. 2 Three less rare earth combined magnet poles Halbach PMSMs

少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机的组合磁极中包括稀土钕铁硼和非稀土铁氧体两种材料。稀土 Halbach 永磁同步电机与少稀土 T 型、少稀土 HAT 型电机中每极永磁体分成三块,少稀土 LREH 型电机中每极永磁体分成四块。电机一极永磁体充磁方向如图 1、2 中箭头所示。

稀土 Halbach 永磁同步电机和少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机的外型尺寸和额定参数相同,如表 1 所示。

表 1 永磁同步电机额定参数及外型尺寸

Tab. 1 Rated parameters and size of PMSM

参数名称	参数值
额定功率/W	750
额定电压/V	380
额定转矩/(N·m)	4.77
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
定子外径/mm	122
轴向长度/mm	66

2 四种结构永磁同步电机性能分析

2.1 空载气隙磁密

电机的能量转换是在气隙中完成的,因此气隙磁密的幅值及谐波含量与电机的电磁性能密切相关。一般来说,气隙磁密的基波幅值越大,则代表电机的输出转矩性能越好;气隙磁密的谐波含量越少,则代表电机运行中的平稳性越好。四种电机模型在额定负载时均能满足电机额定输出功率。空载时四种电机模型气隙磁密及谐波分析,如图3所示。

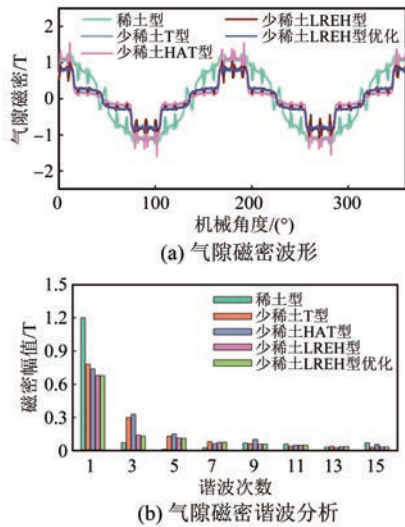


图3 空载电机气隙磁密波形和谐波分析

Fig. 3 No-load air-gap magnetic flux density waveform and harmonic analysis

从图3可知,稀土型 Halbach 永磁同步电机气隙磁密波形正弦度较好;基波幅值最大,第3次、第5次和第7次谐波幅值最小;转矩性能更好且运行平稳。可见,稀土型 Halbach 永磁同步电机性能好,但缺点是稀土永磁材料耗费多,成本高。

三种少稀土类型 Halbach 电机由于稀土钕铁硼永磁材料用量少,基波幅值比稀土型 Halbach 少,要达到相同的电磁转矩则必须选择更多的线圈匝数。混合磁极中钕铁硼和铁氧体的性能不同,导致气隙磁密波形呈现阶梯状分布。少稀土三种类型电机的第3次、第5次和第7次谐波幅值高于稀土型电机。其中少稀土 LREH 型高次谐波性能优于少稀土 T 型和 HAT 型。少稀土 Halbach 永磁同步电机在磁性能上比少稀土型电

机略差,但优点是稀土永磁材料用量少,成本较低。

少稀土组合磁极 Halbach 电机的设计目标是在降低电机的材料成本的基础上尽可能获得接近稀土 Halbach 永磁同步电机的转矩性能。

2.2 空载反电势

利用有限元分析法对四种永磁同步电机模型进行空载仿真分析,空载状态下电机磁密分布如图4所示。

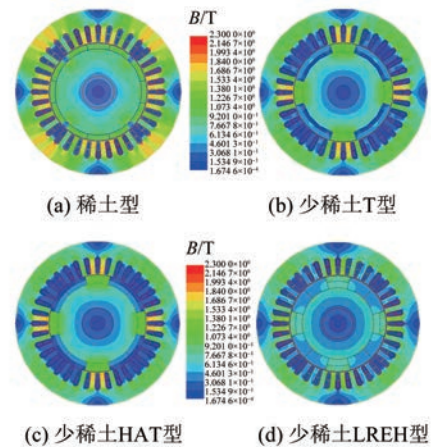


图4 空载电机磁密分布

Fig. 4 No-load magnetic flux density distribution

图5和图6分别为电机在1500 r/min运行时四种电机模型的空载反电动势波形和空载反电势谐波分析。稀土永磁同步电机与少稀土T型、HAT型和LREH型永磁同步电机的空载反电势的有效值分别为187.7 V、197.9 V、191.6 V和188 V。其中少稀土 LREH 型电机可通过斜槽方法进一步得到优化模型从而可达到与稀土 Halbach 永磁同步电机模型相近的空载反电势有效值。在谐波方面,稀土 Halbach 永磁同步电机空载气隙磁通密度波形正弦度最佳,第3次谐波最小。少稀土 LREH 型永磁同步电机波形正弦度次之,第3次谐波优于少稀土 T 型和 HAT 型永磁同步电机。

2.3 空载齿槽转矩

稀土永磁同步电机与少稀土 T 型、HAT 型和 LREH 型永磁同步电机的齿槽转矩波形如图7所示。

可以看出稀土 Halbach 永磁同步电机、少稀土 T 型、少稀土 HAT 型和少稀土 LREH 型永磁同步电机的齿槽转矩幅值分别为148 mN·m、268 mN·m、560 mN·m 和200 mN·m。

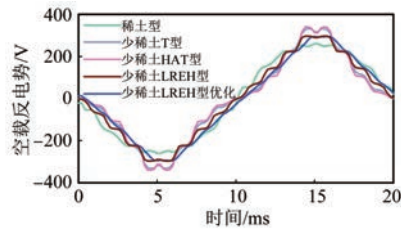


图 5 空载反电势波形

Fig. 5 No-load back electromotive force waveform

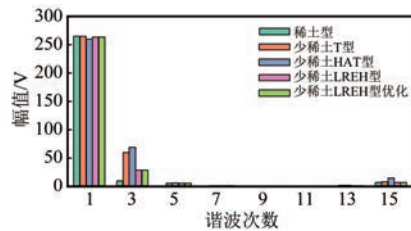


图 6 空载反电势谐波

Fig. 6 Harmonic of no-load back electromotive force

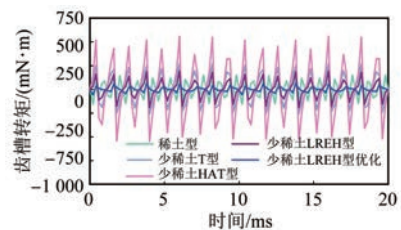


图 7 空载齿槽转矩

Fig. 7 No-load cogging torque

稀土 Halbach 永磁同步电机空载气隙磁通密度波形正弦度最佳, 因此齿槽转矩最小。少稀土 LREH 型永磁同步电机波形正弦度次之, 少稀土 HAT 型则最差。斜槽优化的少稀土 LREH 型永磁同步电机的齿槽转矩幅值为 $60.8 \text{ mN} \cdot \text{m}$ 。通过对比可知少稀土 LREH 型永磁同步电机齿槽转矩性能优于少稀土 T 型和 HAT 型。经过斜槽优化后的少稀土 LREH 型永磁同步电机能进一步有效降低齿槽转矩。

2.4 额定负载电磁转矩

进一步评估四种电机模型的转矩性能。为了公平地比较与分析电机的电磁转矩, 在四种电机模型中通入相同的额定电流。额定负载运行下电机的电磁转矩波形如图 8 所示。

稀土永磁同步电机、少稀土 T 型、HAT 型和 LREH 型永磁同步电机的电磁转矩平均值分别为 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、 $5.03 \text{ N} \cdot \text{m}$ 、 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 和 $4.96 \text{ N} \cdot \text{m}$, 经过斜槽优化后的少稀土 LREH 型永磁同步电机的电磁转矩

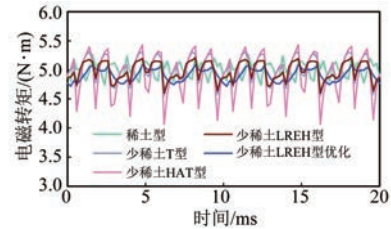


图 8 额定负载电磁转矩波形

Fig. 8 Rated load electromagnetic torque waveform

平均值为 $4.94 \text{ N} \cdot \text{m}$; 电磁转矩波动值分别为 5.2%、7.6%、14.3% 和 6.1%, 经过斜槽优化后的少稀土 LREH 型永磁同步电机的电磁转矩波动为 3.7%。优化的少稀土 LREH 型永磁同步电机电磁转矩略有下降, 但仍满足永磁同步电机的额定输出功率性能需求, 同时电磁转矩波动小, 电机运行更为平稳。由此可知, 相同尺寸的少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机在电磁转矩上可达到稀土永磁同步电机相同的性能。

3 等转矩条件下组合磁极中永磁体厚度对材料成本的影响

3.1 电机主要部件材料价格

电机材料成本主要包括定子铁心、转子铁心、永磁体和定子绕组四个部分的材料成本。忽略材料价格受加工工艺、购买数量和年份等因素的影响。本文分析中材料价格依据的时间为 2022 年 12 月。电机主要材料价格如表 2 所示。

表 2 电机主要材料价格表

Tab. 2 Motor main material price list $\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$

材料	价格
硅钢片 DW315-50	12
铜线绕组	65
铁氧体 Y40	15
稀土永磁体 NdFeB35	220

3.2 等转矩条件下钕铁硼厚度对电机材料成本的影响

电机设计中选择不同的电、磁负荷比值均能达到相同的额定转矩。电负荷和磁负荷在数值上的选取决定了铜和永磁材料的用量, 从而决定了电机的总材料成本。电机材料中稀土永磁体的价格最贵, 铜线次之, 铁氧体和硅钢片价格较低。电机的总材料成本主要取决于铜线和永磁材料的用量。

以少稀土 LREH 型永磁同步电机为例,为保持永磁同步电机产生相同的电磁转矩,增加组合磁极中钕铁硼厚度的同时在其它参数不变的条件下仅调整绕组匝数。少稀土 LREH 型永磁同步电机的永磁体钕铁硼厚度与绕组匝数的对应关系如表 3 所示。

表 3 等转矩条件下钕铁硼厚度与匝数的关系

Tab. 3 NdFeB thickness versus coil turns with same torque

钕铁硼厚度/mm	绕组匝数
2	59
3	52
4	46
5	46
6	46

钕铁硼价格最贵,其用量对电机的总材料成本影响最大。增加钕铁硼厚度的同时仅调整绕组匝数使电机产生相同的电磁转矩。在等转矩条件下,钕铁硼永磁体厚度对少稀土 LREH 型永磁同步电机材料成本的影响如图 9 所示。

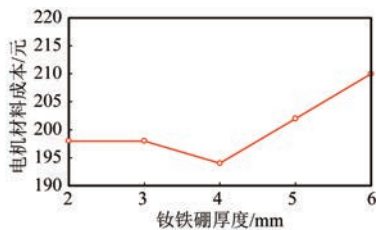


图 9 钕铁硼厚度对电机材料成本的影响(调整匝数)

Fig. 9 Effect of NdFeB thickness on material cost (coil turns are adjusted)

为保持永磁同步电机产生相同的电磁转矩,增加少稀土 LREH 型永磁同步电机的组合磁极中钕铁硼厚度的同时在其它参数不变的条件下仅调整电机轴向长度。永磁体钕铁硼厚度与轴向长度的对应关系如表 4 所示。

表 4 等转矩条件下钕铁硼厚度与轴向长度的关系

Tab. 4 NdFeB thickness versus axial length with same torque

钕铁硼厚度	轴向长度/mm
2	85
3	75
4	66
5	66
6	65

增加钕铁硼厚度的同时仅调整电机轴向长度

使电机产生相同的电磁转矩。在等转矩条件下,钕铁硼永磁体厚度对少稀土 LREH 型永磁同步电机的材料成本的影响如图 10 所示。

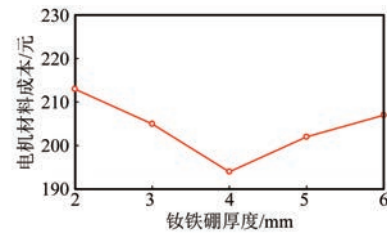


图 10 钕铁硼厚度对电机材料成本的影响(调整轴向长度)

Fig. 10 Effect of NdFeB thickness on material cost (axial length is adjusted)

从图 9 和图 10 可以看出,保持产生相同的电磁转矩的条件下,随着钕铁硼材料厚度的增加,最初钕铁硼厚度增加的成本比定子绕组匝数和轴向长度减少的成本小,导致整体电机材料成本下降。但当钕铁硼厚度达到 4 mm 时,电机电磁转矩增速放缓,意味着增加钕铁硼厚度将不会明显提高电磁转矩,导致定子绕组匝数和轴向长度的减小变化幅度微小,此时电机材料成本随着钕铁硼厚度的增加而增大。可见钕铁硼厚度为 4 mm 时电机材料成本最小。

3.3 等转矩条件下铁氧体厚度对电机材料成本的影响

在保持相同电机电磁转矩的条件下,增加铁氧体厚度的同时在其它参数不变的条件下仅改变定子绕组匝数,少稀土 LREH 型永磁同步电机的铁氧体厚度和绕组匝数的对应关系表 5 所示。

表 5 等转矩条件下铁氧体厚度与匝数的关系

Tab. 5 Ferrite thickness versus coil turns with same torque

铁氧体厚度/mm	绕组匝数
5	52
7	47
9	46
11	48
13	48

增加铁氧体厚度的同时仅调整绕组匝数,使电机产生相同的电磁转矩。在等转矩条件下,铁氧体厚度对少稀土 LREH 型永磁同步电机的材料成本的影响如图 11 所示。

为保持永磁同步电机产生相同的电磁转矩,增加铁氧体厚度的同时在其它参数不变的条件下仅调整电机轴向长度。少稀土 LREH 型永磁同步

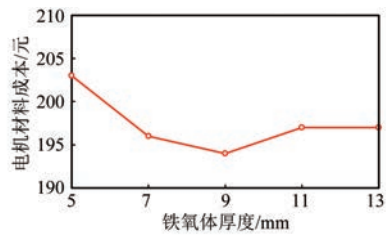


图 11 铁氧体厚度对电机材料成本的影响(调整匝数)
Fig. 11 Effect of ferrite thickness on material cost
(coil turns are adjusted)

电机的永磁体铁氧体厚度与轴向长度对应关系如表 6 所示。

表 6 等转矩条件下铁氧体厚度与轴向长度的关系
Tab. 6 Ferrite thickness versus axial length with
same torque

铁氧体厚度	轴向长度
5	75
7	67
9	66
11	68
13	69

增加铁氧体厚度的同时仅调整电机轴向长度保持使电机产生相同的电磁转矩。在等转矩条件下,少稀土 LREH 型永磁同步电机的永磁体铁氧体厚度对电机材料成本的影响如图 12 所示。

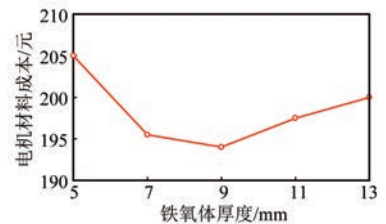


图 12 铁氧体厚度对电机材料成本的影响(调整轴向长度)
Fig. 12 Effect of ferrite thickness on material cost
(axial length is adjusted)

从图 11 和图 12 可以看出,保持产生相同的电磁转矩的条件下,随着铁氧体材料厚度的增加,最初铁氧体厚度增加的成本比定子绕组匝数和轴向长度减少的成本小,导致电机的总材料成本下降。但当铁氧体厚度超过 9 mm 时,由于饱和现象,电机电磁转矩增速放缓,意味着增加铁氧体厚度将不会明显提高电磁转矩,导致定子绕组匝数和轴向长度的减小变化幅度微小,此时电机材料成本随着铁氧体厚度的增加而增大。可见铁氧体厚度为 9 mm 时电机的材料成本最小。

4 四种结构永磁同步电机材料成本对比分析

少稀土永磁同步电机采用铁氧体永磁材料部分替代钕铁硼永磁材料,以减少钕铁硼材料的用量。然而,为了保持相同的转矩性能,必须增加绕组匝数和铁氧体的厚度,导致电机绕组铜线和永磁体的总质量增加,永磁同步电机成本可能会增加。同时由于铁氧体永磁材料的价格远小于钕铁硼永磁材料的价格,钕铁硼永磁材料和铁氧体永磁材料的用量对于电机整体的成本分析非常重要。

根据电机主要部件尺寸参数,确定稀土 Halbach 永磁同步电机、少稀土 T 型永磁同步电机、少稀土 HAT 型永磁同步电机和少稀土 LREH 型永磁同步电机的定转子铁心、永磁体和电机绕组的质量。根据表 2 中电机各部分材料的价格,确定在产生相同额定电磁转矩的条件下电机主要材料的成本。稀土 Halbach 永磁同步电机、少稀土 T 型、HAT 型和 LREH 型组合磁极 Halbach 永磁同步电机的各部分材料的质量和价格分别如表 7~表 10 所示。

表 7 稀土 Halbach 永磁同步电机材料成本

材料	质量/kg	价格/元
硅钢片 DW315-50	7.9	95
绕组铜线	0.55	36
NdFeB35	0.4	88
总计	8.85	219

表 8 少稀土 T 型永磁同步电机材料成本

材料	质量/kg	价格/元
硅钢片 DW315-50	7.9	95
绕组铜线	0.82	54
NdFeB35	0.25	55
铁氧体	0.14	2
总计	9.11	206

表 9 少稀土 HAT 型永磁同步电机材料成本

材料	质量/kg	价格/元
硅钢片 DW315-50	7.9	95
绕组铜线	0.84	55
NdFeB35	0.25	55
铁氧体	0.14	2
总计	9.13	207

对四种电机模型质量和材料成本对比分析如图 13 所示。

表 10 少稀土 LREH 型永磁同步电机材料成本

Tab. 10 Less rare earth LREH-type PMSM material cost

材料	质量/kg	价格/元
硅钢片 DW315-50	7.9	95
绕组铜线	0.95	61
NdFeB35	0.14	30
铁氧体	0.5	8
总计	9.45	194

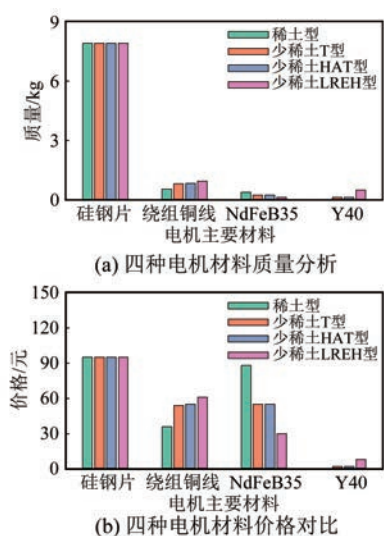


图 13 电机成本对比分析

Fig. 13 Cost comparison with different motors

三种少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机的材料成本均低于传统稀土永磁同步电机。与少稀土 T 型和 HAT 型永磁同步电机相比,少稀土 LREH 型电机通过平衡钕铁硼材料和铁氧体材料的用量进一步降低了稀土永磁材料的用量,使其材料成本低于少稀土 T 型和 HAT 型电机。少稀土 LREH 型永磁同步电机的材料总成本为 194 元,而纯稀土 Halbach 永磁同步电机的材料总成本为 219 元。分析表明少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机可以达到与稀土永磁同步电机同等的转矩性能,能够降低对稀土钕铁硼材料的依赖性,从而降低永磁同步电机的材料成本。

5 结语

本文提出了少稀土 T 型、HAT 型和 LREH 型三种组合磁极 Halbach 永磁同步电机。通过有限元分析方法验证了少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机在相同电机外型尺寸的条件下能达到和

稀土永磁同步电机相同的转矩性能。通过对不同拓扑结构永磁同步电机材料成本的研究可知少稀土组合磁极 Halbach 永磁同步电机材料成本低于稀土永磁同步电机;相对于少稀土 T 型和 HAT 型永磁同步电机,少稀土 LREH 型永磁同步电机的材料成本最低。

参考文献

- [1] GHOROGHCHIAN F, ALIABAD A D, AMIRI E. Design and analysis of consequent-pole line start permanent magnet synchronous motor [J]. IET Electric Power Applications, 2020, 14(4): 678-684.
- [2] ZHAO X K, KOU B Q, HUANG C C, et al. A reverse-salient permanent magnet synchronous motor for electric vehicles considering operating conditions [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(1): 262-272.
- [3] 于艳君, 崔明恺, 柴凤. 双绕组永磁同步电机滑膜变结构控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(22): 5799-5807.
- YU Y J, CUI M K, CHAI F. Sliding mode variable structure control of a dual-winding permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(22): 5799-5807.
- [4] BAHFIE F, KABAN N O B, SUPRIHATIN S, et al. Properties of rare-earth element in magnetic material and its processing [J]. USPEHI FIZIKI Metallov-Progress in Physics of Metals, 2023, 24(1): 157-172.
- [5] CHA H R, KIM T H, LEE J G. Development trend of high performance hot-deformed Nd-Fe-B magnet [J]. Journal of the Korean Magnetics Society, 2022, 32(2): 72-83.
- [6] 鲁富强, 任少卿, 赵明静, 等. 永磁电机用钕铁硼磁体性能参数测试与分析[J]. 冶金与材料, 2021, 41(5): 59-60.
- LU F Q, REN S Q, ZHAO M J, et al. Measurement and analysis of performance parameters of NdFeB magnet for permanent magnet motor [J]. Metallurgy and Materials, 2021, 41(5): 59-60.
- [7] 王浙栋. 稀土永磁同步电机设计制造中的控制要点分析[J]. 工业设计, 2017(6): 170-171.
- WANG Z D. Analysis of control points in design and

- manufacture of rare earth permanent magnet synchronous motor [J]. Industrial Design, 2017, (6): 170-171.
- [8] 许旭升. 稀土永磁材料的现状和发展趋势[J]. 冶金与材料, 2019, 39(5): 178-179.
- XU X S. Status and development trend of rare earth permanent magnet materials [J]. Metallurgy and Materials, 2019, 39(5): 178-179.
- [9] 申璐. 基于专利分析的稀土永磁材料产业发展研究[J]. 科技和产业, 2023, 23(5): 87-91.
- SHEN L. The development of rare earth permanent magnet industry based on patent analysis [J]. Science Technology and Industry, 2023, 23(5): 87-91.
- [10] BOLDEA I, TUTELEA L N, PARSA L, et al. Automotive electric propulsion systems with reduced or no permanent magnets: An overview [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(10): 5696-5711.
- [11] 吴伟强, 朱孝勇, 项子旋, 等. 少稀土组合励磁永磁无刷电机设计与分析[J]. 电机与控制应用, 2018, 4(9): 73-78.
- WU W Q, ZHU X Y, XIANG Z X, et al. Design and analysis of a less rare earth permanent magnet brushless motor with hybrid permanent magnets [J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 4(9): 73-78.
- [12] 司响, 朱孝勇, 左月飞, 等. 基于移相解耦调制的少稀土混合励磁电机驱动性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7899-7908+8227.
- SI X, ZHU X Y, ZUO Y F, et al. Research on drive performance of the less rare earth hybrid excitation PM motor based on decoupled SVPWM control strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7899-7908+8227.
- [13] RIVERA C A, UGALDE G, BADIOLA X, et al. Less rare-earth electromagnetic design for a high-performance permanent magnet motor [J]. Applied Sciences-Basel, 2022, 12(8): 3736-3755.
- [14] 庄佳红. 混合磁材料少稀土永磁电机的设计与分析[D]. 扬州: 扬州大学, 2020.
- ZHUANG J H. Design and analysis of rare earth permanent magnet motor with mixed magnetic materials [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020.
- [15] GUGLIELMI P, BOAZZO B, ARMANDO E, et al. Permanent-magnet minimization in PM-assisted synchronous reluctance motors for wide speed range [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(1): 31-41.
- [16] 王伟男. 电动汽车用多层磁障式少稀土永磁同步电机关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- WANG W N. Research on key technologies of multi-layer flux-barrier less rare earth permanent magnet synchronous machines for electric vehicles [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [17] KANO Y, MORIMOTO S, ASANO Y, et al. Recent technical trends in permanent magnet synchronous motors [J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2016, 11(6): 804-801.
- [18] WANG Y W, BIANCHI N, QU R H. Comparative study on non-rare-earth and rare-earth PM motors for EV applications [J]. Energies, 2022, 15(8): 2711-2728.
- [19] LIU X, ZHENG X L, WANG X Y. Modeling of uneven air gap magnetic field for disc planetary permanent magnet machine with segmented gap Halbach array [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(1): 693-702.
- [20] 李胜, 谢海东, 邓锐, 等. Halbach 结构在永磁交流伺服电机中的应用[J]. 微电机, 2022, 55(8): 92-96.
- LI S, XIE H D, DENG R, et al. Application of Halbach structure in permanent magnet AC servo motor [J]. Micromotors, 2022, 55(8): 92-96.
- [21] 高峰阳, 齐晓东, 李晓峰, 等. 部分分段 Halbach 永磁同步电机优化设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(4): 787-800.
- GAO F Y, QI X D, LI X F, et al. Optimization design of partially-segmented Halbach permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical society, 2021, 36(4): 787-800.

收稿日期:2023-07-11

收到修改稿日期:2023-09-27

作者简介:

李宗耀(2001-),男,硕士研究生,研究方向为 Halbach 永磁同步电机分析与设计,20196767@s.hljtu.edu.cn;

* 通信作者:李春艳(1980-),女,博士,副教授,研究方向为永磁同步电机弱磁控制、少稀土永磁同步电机及反凸极永磁同步电机分析与设计,lichunyan@hlju.edu.cn。

Research on Performance and Material Cost of Halbach Permanent Magnet Synchronous Motor with Less Rare Earth Combined Magnet Poles

LI Zongyao, QIU Chu, CHE Shuang, LI Chunyan *

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Key words: less rare earth permanent magnet synchronous motor; combined magnet pole Halbach array; electromagnetic torque; material cost

Expensive rare earth permanent magnet materials lead to increase material cost of permanent magnet synchronous motor (PMSM). Under this background, reducing the dependence on rare earth permanent magnet (PM) materials without reducing the electromagnetic torque performance is one of the research hot spots of PMSM.

Three kinds of Halbach PMSMs with less rare earth combined magnet poles are proposed, which can effectively reduce the amount of rare earth permanent magnet materials in the motor structure. Thus, the motor material cost is reduced. The electromagnetic torque is improved by using the Halbach array and combined magnet poles.

Three kinds of less rare earth PMSMs with combined magnet poles are studied and compared with a rare-earth PMSM in terms of no-load back electromotive force, no-load cogging torque and rated load electromagnetic torque. Fig. 1 shows the electromagnetic torque waveform of less rare earth Halbach PMSM and rare earth PMSM. It can be seen from the figure that less rare earth Halbach

PMSM with combined magnet poles can achieve the same electromagnetic torque performance as the rare earth PMSM.

The effects of permanent magnets NdFeB and ferrite thickness on material cost of less rare earth PMSM with combined magnet poles is studied under the condition of same electromagnetic torque. The material cost of rare earth PMSM and three kinds of less rare earth PMSMs with combined magnet poles is compared and analyzed. The quality and material cost prices of the four motors are shown in Tab.1. The results by finite element simulation show that the LREH type of less rare earth Halbach PMSM has better torque performance and lower material cost.

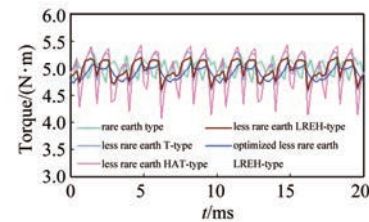


Fig. 1 Rated load electromagnetic torque waveform

Tab.1 The quality and material cost of the PMSMs with same torque

Material	Rare earth PMSM		Less rare earth T-type PMSM		Less rare earth HAT-type PMSM		Less rare earth LREH-type PMSM	
	Quality/kg	Price/ ¥	Quality/kg	Price/ ¥	Quality/kg	Price/ ¥	Quality/kg	Price/ ¥
Silicon steel sheet	7.9	95	7.9	95	7.9	95	7.9	95
copper wire	0.55	36	0.82	54	0.84	55	0.95	61
NdFeB35	0.4	88	0.25	55	0.25	55	0.14	30
Ferrite	0	0	0.14	2	0.14	2	0.5	8
Total	8.85	219	9.11	206	9.13	207	9.45	194