

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2212328

复合结构混合永磁电机抗退磁性能分析及优化^{*}

陈云云 李紫茵 周鑫 蔡同乐

(扬州大学电气与能源动力工程学院 扬州 225127)

摘要: 针对传统稀土永磁电机的稀土永磁材料用量高的问题,本文提出一种由钕铁硼和铁氧体混合永磁的交替极加局部 Halbach 结构的少稀土永磁同步电机,分析了该复合结构混合永磁电机的结构特点。比较分析了该电机与传统一字型钕铁硼稀土永磁电机的电磁性能,并依据退磁特性建立了该电机的局部退磁有限元模型,通过磁路耦合联合仿真对电机多运行工况进行了仿真,针对高速弱磁和变载运行工况下电机局部退磁的性能损耗,以提高永磁体工作点和降低退磁率为优化目标,给出了该电机的抗退磁优化设计方案。仿真结果验证了所提电机结构的合理性,电机抗退磁性能较优化前提升了 10.3%。

关键词: 内置式永磁同步电机;混合永磁;铁氧体退磁;有限元分析;场路耦合

中图分类号: TM351 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470

Analysis and optimization of anti-demagnetization performance of composite structure hybrid permanent magnet motor

Chen Yunyun Li Ziyin Zhou Xin Cai Tongle

(College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

Abstract: Aiming at the problem of high consumption of rare earth permanent magnet materials in traditional rare earth permanent magnet motor, this paper proposes a rare earth permanent magnet synchronous motor with alternating pole and local Halbach structure composed of NdFeB and ferrite hybrid permanent magnets, and analyzes the structural characteristics of the hybrid permanent magnet motor. The electromagnetic performance of the motor and the traditional one-shaped Nd-Fe-B rare earth permanent magnet motor is compared and analyzed, and the local demagnetization finite element model of the motor is established according to the demagnetization characteristics. The multi-operating conditions of the motor are simulated by magnetic circuit coupling co-simulation. Aiming at the performance loss of local demagnetization of the motor under high-speed field weakening and variable load operating conditions, the anti-demagnetization optimization design scheme of the motor is given to improve the working point of the permanent magnet and reduce the demagnetization rate. The simulation results verify the rationality of the proposed motor structure, and the anti-demagnetization performance of the motor is improved by 10.3% compared with that before optimization.

Keywords: inner-mounted permanent magnet synchronous motor; hybrid permanent magnet; ferrite demagnetization; finite element analysis; field-circuit coupling

0 引言

永磁同步电机具有结构简单、运行可靠、损耗小、效率高诸多优点,在驱动装置、压缩机、泵站、医疗器械等多个领域得到了广泛应用^[1]。但稀土永磁同步电机中,稀土永磁材料存在供应不足和价格波动等问题。为了减少稀土永磁电机的大规模应用发展对稀土材料的依赖,研发减少稀

土材料用量的同时提升稀土材料深度利用率的少稀土永磁电机^[2],以及采用稳定且价格低廉的铁氧体等非稀土永磁材料的非稀土永磁电机,已逐渐引起电机领域研究人员的关注^[3-4]。

非稀土铁氧体永磁电机在材料成本方面优势明显,然而,非稀土铁氧体永磁材料磁能积小,使得电机的转矩密度和功率密度提升受限,电机电负荷的增加也会加剧永磁材

收稿日期:2022-12-07

^{*} 基金项目:江苏省农业科技自主创新项目重大课题(CX(22)1005)项目资助

料的不可逆退磁风险。少稀土类混合永磁电机则是在非稀土铁氧体电机中,添加少量稀土永磁材料,形成组合励磁,能够减少稀土永磁材料用量的同时保持永磁电机的高输出转矩能力^[5-6]。同时,还可以通过合理设计混合磁路,提高混合永磁电机的抗退磁能力^[7]。文献[8]对集成式启动发电机(integrated starter generator, ISG)进行研究,依据铁氧体退磁量确定铁氧体厚度和钕铁硼尺寸,通过对比仿真说明 ISG 混合永磁电机性能优于 ISG 钕铁硼电机且具有高性价比。文献[9]中,针对混合永磁电机中钕铁硼产生的反向磁场造成邻极铁氧体的不可逆退磁问题,对该极由钕铁硼和铁氧体组成的并联励磁结构进行优化,并用铁氧体替代该钕铁硼形成新的励磁组合以避免邻极铁氧体的不可逆退磁,提高电机可靠性。文献[10]针对永磁体高速下损耗严重进行研究,提出分别在 dq 轴磁路中引入铁氧体永磁体以抑制涡流损耗,提高电机的磁阻转矩和成本效益。可见,针对混合永磁电机,如何设计混合永磁材料的摆放和优化尺寸配比^[11-12],通过合理的转子结构设计以提高电机转矩密度和降低永磁材料退磁风险是该类混合永磁电机设计的研究热点之一^[13-14]。

在保证电机性能的前提下,为提高稀土永磁材料利用率,减少稀土永磁材料用量,本文提出了由钕铁硼和铁氧体混合励磁的复合结构混合永磁(composite structure hybrid permanent magnet, CS-HPM)电机,将交替极结构、轮辐式结构和 Halbach 阵列灵活有效融合,形成新型的复合结构电机。分析了该 CS-HPM 电机的结构特点,与传统一字型钕铁硼稀土永磁(NdFeB permanent magnet, Nd-PM)电机的电磁性能作比较分析,采用有限元法研究电机退磁特性并建立退磁模型,通过磁路耦合联合仿真方法分析电机的退磁性能损耗;以提高永磁体工作点和降低退磁率为目标优化转子结构,仿真结果表明所提电机结构和抗退磁优化设计方法的有效性。

1 CS-HPM 电机结构分析

CS-HPM 电机结构如图 1 所示。定子选用 10 极 12 槽的分数槽集中式绕组结构,节省用铜量的同时降低了定子铜损。相较于整数槽集中式绕组,反电动势的正弦性得以提高,初步减小了电机的齿槽转矩和转矩脉动。

在转子中,出于保证电磁性能的同时节省钕铁硼用量的考虑,在转子外径贴近气隙处,内置的钕铁硼永磁体采用扇形交替极结构,统一朝向气隙侧径向充磁,该结构同时能够抑制由电枢磁场造成的涡流损耗。

转子中间部分采用由铁氧体和少量钕铁硼组成的具有聚磁效应的并联轮辐式结构,均为切向充磁。另外,为提高气隙磁密及铁氧体利用率,在转子内径靠近转轴侧处,铁氧体采用 Halbach 阵列结构,每极由 2 块永磁体构成。径向充磁和切向充磁永磁体按照圆周有序排列,使磁力线朝向气隙方向汇聚,从而减少铁氧体漏磁。

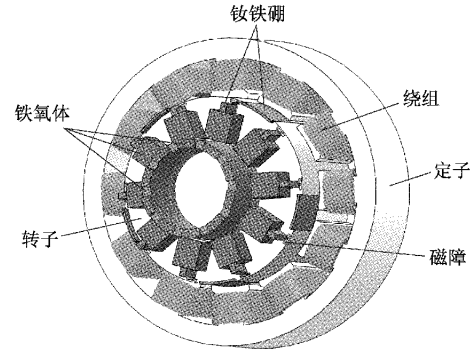


图 1 CS-HPM 电机结构

2 CS-HPM 电机电磁性能分析

为方便分析所提 CS-HPM 电机性能,选取传统一字型 Nd-PM 电机作为参考电机,电机结构如图 2 所示。在定子绕组、定转子尺寸、铁心长度,额定功率相同的约束条件下,分析比较两种电机的电磁性能,两台电机的主要参数如表 1 所示。

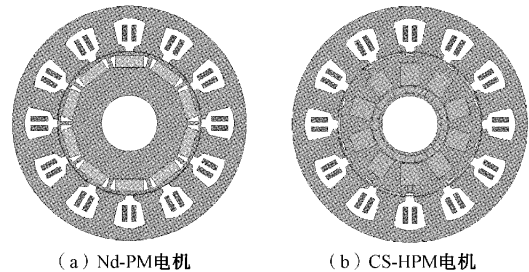


图 2 电机有限元仿真模型

表 1 电机主要参数

电机	Nd-PM 电机	CS-HPM 电机
额定功率/kW		5
额定转速/rpm		1 200
定子外径/mm		200
定子内径/mm		123
转子外径/mm		122
转子内径/mm		48
铁心长度/mm		68
钕铁硼用量/mm ³	159 800	33 268
铁氧体用量/mm ³	0	275 455
永磁体成本/元	504	160

2.1 空载特性对比

图 3 为两种电机的空载反电势波形及谐波含量对比。可以看出,CS-HPM 电机的反电势幅值略低于 Nd-PM 电机,这是由于 CS-HPM 电机中铁氧体材料在励磁源中占比大,稀土永磁材料用量远低于 Nd-PM 电机。但从图 3(b)中可以看出,CS-HPM 电机的基波幅值大于传统电机,且

3 次谐波幅值明显低于 Nd-PM 电机。经计算,传统电机反电势谐波畸变率为 11.9%,混合永磁电机反电势谐波畸变率为 6.5%。在空载反电势幅值相差不大的情况下,CS-HPM 电机谐波畸变率近乎为 Nd-PM 电机的 1/2。

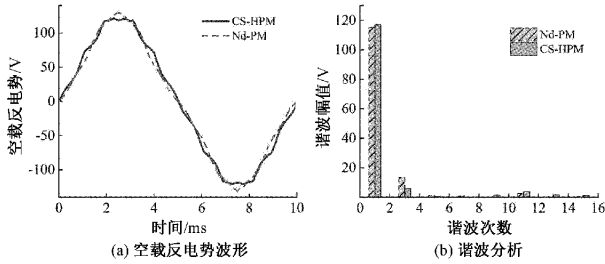


图 3 空载反电势对比

2.2 转矩特性对比

图 4 比较了 Nd-PM 电机和 CS-HPM 电机在额定转速下通入不同电流时的输出转矩。可以看出,当通入电流小于 35 A(1.25 倍负载)时,CS-HPM 电机和 Nd-PM 电机的输出转矩能力相当,当通入电流超过 35 A 后,CS-HPM 电机的输出转矩落后于 Nd-PM 电机,这是由于随着输入电流增大,CS-HPM 电机中的铁氧体存在局部不可逆退磁风险,这将导致电机转矩输出性能的下降。

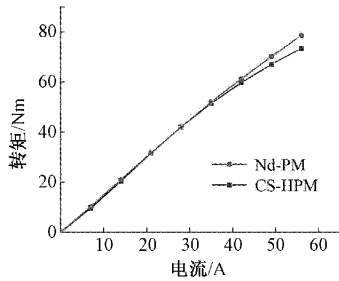


图 4 两种电机电磁转矩-电流特性对比

3 CS-HPM 电机退磁损耗分析

3.1 退磁特性分析

从上述转矩特性可以看出,混合永磁电机在过载工况下不具备良好的抗退磁能力,图 5 为电机在额定工况和 2 倍过载工况下的铁氧体退磁率云图。色谱颜色代表退磁程度系数 $Demag_Coef$, 定义如下:

$$Demag_Coef = B_{r1}/B_{r0} \quad (1)$$

式中: B_{r0} 为剩磁, B_{r1} 为回复剩磁。 $Demag_Coef = 0$ 表示永磁体完全失磁,退磁程度系数 $Demag_Coef$ 数值越小,表示退磁越严重。

图 5(a)为额定工况下铁氧体退磁率云图,可以看出铁氧体全域的退磁程度系数高于 89%,永磁体几乎没有发生退磁。图 5(b)为 2 倍过载工况下铁氧体退磁率云图,可以看出轮辐式铁氧体端部和 Halbach 阵列中铁氧体局部失磁范围变大、程度加深,最高失磁率可至 56%,局部退磁较为严重。

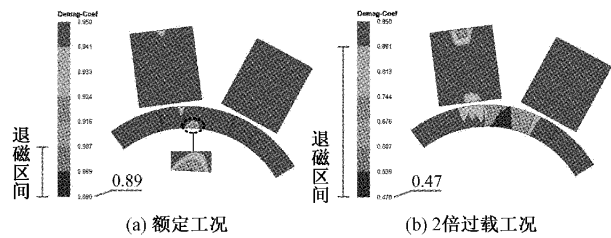


图 5 铁氧体退磁率云图

为方便表示永磁体的平均退磁程度,这里将空载反电势的变化量与退磁前空载反电势的比值定义为永磁材料的平均退磁比例系数,即式(2)所示。

$$K = \frac{\Delta E}{E_0} \times 100\% \quad (2)$$

由此算得 CS-HPM 电机不同过载倍数下的铁氧体平均退磁比例系数如表 2 所示。可知,电机在额定工况下退磁比例很小,当通入 35 A(1.25 倍过载)电流时,退磁比例明显增大,且随着过载电流的增大,退磁比例系数呈现不同程度的增加,这与图 5 的分析结果基本一致。

表 2 不同过载倍数下的平均退磁比例系数

过载倍数	0	1	1.25	1.5	1.75	2
空载反电势幅值/V	124.2	123.8	114.0	112.1	110.3	107.7
退磁比例系数 K/%	0	0.4	8.3	9.7	11.2	13.3

3.2 退磁模型及性能损耗分析

根据上述 CS-HPM 电机在 2 倍过载工况下的退磁特性分析结果,建立电机不均匀退磁模型如图 6 所示。轮辐式铁氧体中,利用空气填充端部代表该永磁体局部失磁; Halbach 阵列永磁体中,通过修改永磁体材料的矫顽力和剩磁参数大小模拟永磁体不同程度的均匀退磁。

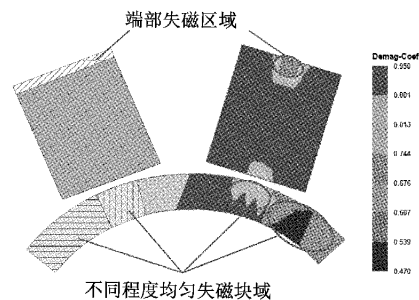


图 6 铁氧体不均匀退磁模型

为提高电机多运行工况的仿真精度,本文在 Maxwell 2D 中创建电机模型, SImplorer 中搭建控制电路。采用磁路耦合联合仿真的方法,在高速弱磁和变载运行工况下针对电机的局部退磁性能损耗进行分析。

在仿真过程中,电机速度给定为 2 倍额定转速 2 400 rpm,

进入空载运行后分别给定 5、15、25 Nm 的负载转矩。电机转矩波形、转速波形，涡流损耗以及铁心损耗波形分别如图 7~10 所示。

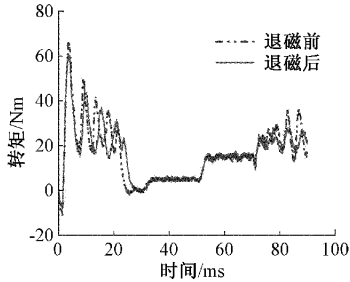


图 7 转矩波形

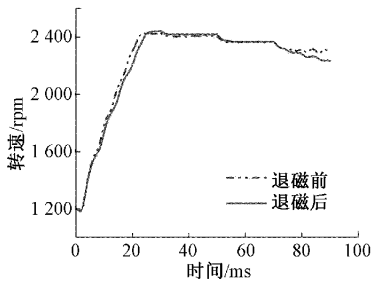


图 8 转速波形

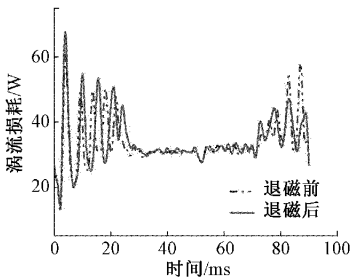


图 9 涡流损耗波形

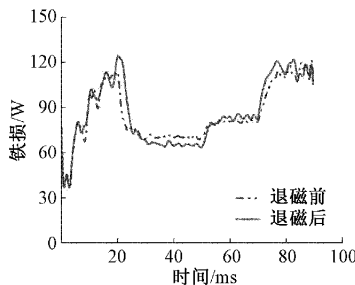


图 10 铁心损耗波形

图 7 为电机转矩波形对比，可以看出永磁体局部退磁后，CS-HPM 电机的转矩输出能力有所下降。在电机启动阶段，局部退磁电机在 2 倍额定转速下的峰值扭矩约为 61 Nm，小于未退磁电机的峰值扭矩 66.2 Nm；电机达到给定转速后进入变载运行阶段，当给定 25 Nm 负载指令时，局部退磁电机仅输出 22.4 Nm 的平均转矩，小于负载指令；而未退磁电机全程都能够快速跟随指令要求，输出指定

转矩。

观察图 8 的转速波形可得，永磁体局部退磁后，CS-HPM 电机启动阶段的响应变慢；启动过程结束后，电机在跟随均匀增加的负载指令时，转速牺牲程度加剧，且波动增大。当负载指令增加至 25 Nm 后，局部退磁电机转速呈下降趋势，这是由于永磁体局部失磁后电机的输出转矩小于给定负载，电机处于减速状态。

图 9、10 分别为电机涡流损耗和铁心损耗对比。由图可得，电机处于启动阶段时，局部退磁电机的涡流损耗和铁心损耗较退磁前有所增加；启动过程结束后，电机进入变载运行阶段，电机涡流损耗和铁心损耗随着载荷增大而增大。图 9 中，当电机给定 25 Nm 负载时，局部退磁电机的涡流损耗小于退磁前，这是由于涡流损耗大小和磁密的平方成正比^[15]，永磁体局部失磁后导致电机磁密下降。总体而言，永磁体局部退磁后电机铁损有所增加，且比较图 9、10 可得，电机铁损主要来源于铁心损耗，涡流损耗占比较小。

4 抗退磁优化设计

通过上述分析可知，电机局部不可逆退磁后，将导致电机输出转矩能力下降，损耗升高，温度上升还将致使电机进一步退磁，从而缩短电机使用寿命。本章将对该 CS-HPM 电机提出进一步的优化设计，以提高电机抗退磁性能。

针对 CS-HPM 电机中 Halbach 铁氧体阵列退磁不均问题，通过改变铁氧体厚度和相邻两块磁极的宽度比以改善磁场分布，达到降低退磁率的同时提高电机输出转矩的目的。针对 CS-HPM 电机中轮辐式铁氧体端部退磁问题，通过优化永磁体尺寸使空载比磁导 P_0 尽可能的大于退磁曲线拐点斜率，确保电机在满足设计要求的前提下提高铁氧体的平均工作点。

优化方案中涉及的结构尺寸参数如图 11 所示，其优化范围如表 3 所示。

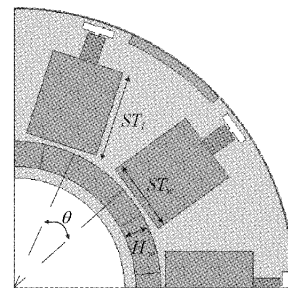


图 11 电机结构参数

表 3 永磁体结构尺寸参数及优化范围

尺寸参数	优化范围
轮辐式铁氧体充磁宽度 ST_w /mm	16~17.5
轮辐式铁氧体长度 ST_l /mm	19~18.1
Halbach 径向充磁铁氧体充磁宽度 H_w /mm	5.4~7
Halbach 切向充磁铁氧体弧宽 θ /($^\circ$)	12~20

图 12(a)为 Halbach 阵列切向充磁铁氧体不同弧宽 θ 所对应的永磁体最大失磁率和电机转矩的仿真结果。以减小最大失磁率和增加转矩为目标,当 θ 取值 14° 时,电机对应失磁程度最小,但失磁范围大;当 θ 取值 13° 时,电机输出转矩最大,但对应失磁程度也较高。结合退磁率云图,最终选取 $\theta = 16^\circ$ 。

图 12(b)为不同永磁体厚度 H_w 所对应的最大失磁率和电机转矩的仿真结果,可以看出输出转矩随着 H_w 增加而增加,失磁率不规则变化。当 H_w 取值 6.4 mm 时,有最小失磁率,但为增加电机转矩密度和为后续优化留出裕量,永磁体厚度 H_w 最终选取为 7 mm。

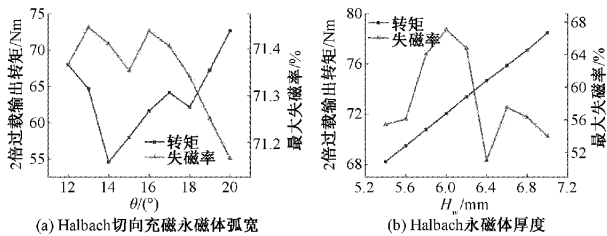


图 12 Halbach 铁氧体尺寸对电机性能影响

Halbach 阵列铁氧体尺寸确定后,结合转子内部空间确定轮辐式铁氧体尺寸优化范围,利用参数化扫描在满足额定转矩要求的情况下,尽可能提高永磁体的工作点。仿真结果如图 13 所示。

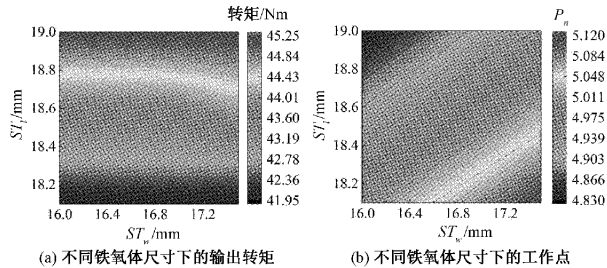


图 13 轮辐式铁氧体尺寸对电机性能影响

图 13 为轮辐式铁氧体尺寸与电机转矩和永磁体平均工作点之间的关系。从图 13(a)中观察到电机的输出转矩随着铁氧体长度 ST_l 增加而增加,铁氧体宽度 ST_w 对转矩影响不大。当 ST_l 取值 18.3 mm 时,电机达到额定转矩要求。图 13(b)为轮辐式铁氧体尺寸对永磁体平均工作点的影响,可以看出永磁体的平均工作点随着 ST_w 增加而增加,为提高永磁体工作点, ST_w 选取为 17.5 mm。综上所述分析,最终确定了永磁体结构尺寸,如表 4 所示。

表 4 永磁体尺寸参数优化前后取值变化

尺寸参数	优化前	优化后
轮辐式铁氧体充磁宽度 ST_w /mm	16	17.5
轮辐式铁氧体长度 ST_l /mm	19	18.3
Halbach 径向充磁铁氧体充磁宽度 H_w /mm	5.5	7.0
Halbach 切向充磁铁氧体弧宽 θ / $^\circ$	12	16

图 14 为优化前后电机处于 2 倍过载工况下的铁氧体退磁率云图,可以看出,轮辐式铁氧体和 Halbach 铁氧体阵列的退磁程度均得到有效改善。

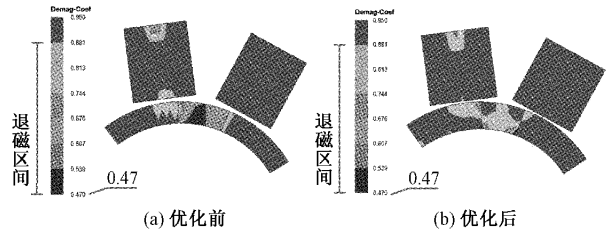


图 14 优化前后 2 倍过载工况下铁氧体退磁率云图

为更直观表现优化效果,图 15 为优化前后电机在不同过载工况下的平均退磁比例系数和转矩特性对比。由图 15(a)可知,优化前,电机在 2 倍过载工况下的铁氧体平均退磁比例系数为 13.3%,优化后降为 3%,可见电机抗退磁性能得到明显提升。观察图 15(b)可以看出,得益于优化后永磁材料退磁风险的有效降低,过载工况下的电机转矩有所增加,且随着过载倍数增大,电机转矩性能提升越明显。

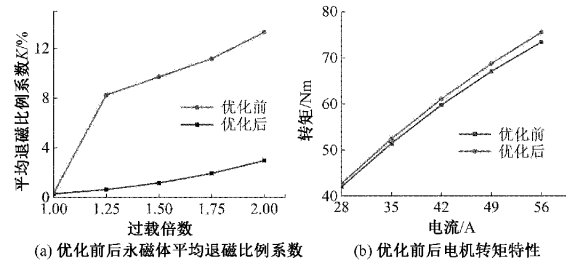


图 15 优化前后电机性能变化

5 结 论

本文提出了由钕铁硼和铁氧体共同励磁的 CS-HPM 电机,融合了交替极结构,轮辐式结构和 Halbach 阵列 3 种结构,对比 Nd-PM 电机,额定工况下性能相当的同时减少了稀土永磁材料的用量,电机成本效益得以提高。但 CS-HPM 电机主要由铁氧体励磁,过载工况下存在一定退磁风险,需要对电机永磁体退磁特性进行充分分析与校核,对比通常采用的云图观察法,空载反电势对比法更加直观。通过磁路耦合联合仿真分析电机局部退磁后的性能损耗,可以发现,永磁体局部退磁后,电机转矩输出能力下降,损耗升高。针对铁氧体退磁分布特性,对永磁体结构尺寸进行变量优化以提高永磁体工作点和降低退磁率。仿真结果表明,转子结构优化设计有效降低了铁氧体退磁风险,CS-HPM 电机的过载能力得到提升。

参考文献

[1] 陈义中. 电动机能效提升技术及其发展现状[J]. 电机技术, 2015(6): 37-38, 41.
 [2] LI J, WANG K. A novel spoke-type PM machine

- employing asymmetric modular consequent-pole rotor[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(5):2182-2192.
- [3] 陈羽峰,徐斌,周玉娟,等. 永磁铁氧体材料发展现状与研究进展[J]. 磁性材料及器件,2022(11):1-15.
- [4] HWANG Y H, LEE J. HEV motor comparison of ipmsm with Nd sintered magnet and heavy rare-earth free injection magnet in the same size [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3):1-5.
- [5] HAN J, ZHANG Z. Design and optimization of a low-cost hybrid-pole rotor for spoke-type permanent magnet machine[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(2):1-5.
- [6] CHIU M T, CHIANG J A, LIN C H. Design and optimization of a novel V-type consequent-pole interior permanent magnet synchronous motor for applying to refrigerant compressor[C]. Proceedings of the 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems, 2018:413-418.
- [7] 宋磊. 55 kW 低速大扭矩永磁同步电动机的设计及退磁研究[D]. 曲阜: 曲阜师范大学,2021.
- [8] 王晓光,周晟,李新华,等. 混合动力汽车 ISG 用混合永磁同步电机转子研究[J]. 电机与控制应用,2019, 46(5):107-112.
- [9] JEONG C L, KIM Y K, HUR J, et al. Optimized design of PMSM with hybrid type permanent magnet for improving performance and reliability [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(5): 4692-4701.
- [10] CUI W, REN L, ZHOU J, et al. A new IPMSM with hybrid rotor structure for electrical vehicle with reduced magnet loss [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(2):1-6.
- [11] QI J, ZHU Z Q, YAN L C, et al. Effect of pole shaping on torque characteristics of consequent pole PM machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(3): 3511-3521.
- [12] 上官璇峰,王亚辰. 轴向磁通永磁同步发电机的优化设计研究[J]. 电子测量技术,2017,40(9): 45-52.
- [13] 王晨,黄金霖. 基于响应面法的定子永磁型轴向磁通切换电机齿槽转矩优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2017,31(7):1144-1151.
- [14] 刘勇智,李杰,鄞成龙,等. 基于 KELM-SAPSO 的开关磁阻电机优化设计[J]. 电子测量与仪器学报,2019, 33(2):148-153.
- [15] 齐晓东,高锋阳,李晓峰,等. 表贴式永磁同步电机新型偏心磁极优化设计[J]. 电子测量与仪器学报,2020, 34(8):93-100.

作者简介

陈云云,硕士生导师,副教授,主要研究方向为永磁型电机设计与控制。

E-mail:yychen@yzu.edu.cn

李紫茵(通信作者),硕士研究生,主要研究方向为混合永磁电机优化设计及控制。

E-mail:2291657970@qq.com