

轴向磁场永磁同步电机转子涡流损耗研究^{*}

李 雪, 刘福贵, 李 宾, 李 博, 王韶鹏
(河北工业大学, 天津 300130)

摘 要: 为解决轴向磁场永磁同步电机温度过高导致电机运行性能降低的问题, 针对电机转子进行了深入研究。先利用 Maxwell 三维电磁场有限元分析软件建立电机有限元模型, 仿真电机磁场分布和气隙磁密波形, 并计算平均涡流损耗; 采用铜层屏蔽减小转子涡流损耗, 并仿真出转子涡流损耗随铜层厚度变化情况。

关键词: 轴向磁场永磁同步电机; 电磁屏蔽原理; 谐波分量; 涡流损耗

中图分类号: TM 302 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)06-0068-04

Research on Rotor Eddy Current Loss of Axial Magnetic Field Permanent Magnet Synchronous Motor^{*}

LI Xue, LIU Fugui, LI Bin, LI Bo, WANG Shaopeng
(Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: In order to solve the problem that the motor running performance of the axial magnetic field permanent magnet synchronous motor was too high, the rotor of the motor was studied deeply. Firstly, the finite element model of the motor was established by using the finite element analysis software of Maxwell 3D electromagnetic field. The electromagnetic distribution of the motor was simulated and the average eddy current loss was calculated. The eddy current loss of the permanent magnet had been significantly reduced, and the rotor yoke had no harmonics.

Key words: axial magnetic field permanent magnet synchronous motor; electromagnetic shielding principle; harmonic component; eddy current loss

0 引 言

轴向磁场永磁同步电机(Axial Magnetic Field Permanent Magnet Synchronous Motor, AMFPMSM)是一种轴向尺寸短、功率密度高且易于组装的新型电机,利用高矫顽力的钕铁硼作为永磁材料,使得电机结构紧凑、低速平稳运行,效率高、振动噪声大幅度降低。随着计算机、数控机床、工业机器人等高科技产品的兴起和一些特殊应用系统的需要,传统电动机性能已经不能符合要求,AMFPMSM 以其优异的特性开始逐步取代传统电机。然而该电机复杂的磁场使得在高速运行过程中必然会存在与转子转速不同步的磁通密度谐波^[1-4],大量谐波会使永磁体发热,影响电机效率,严重时会使永磁体

退磁或烧毁转子,从而降低电机效率及影响电机性能。因此,分析 AMFPMSM 转子涡流损耗影响因素,进行建模计算,再提出抑制或减小转子涡流损耗的方法显得尤为重要^[5]。

文献[6]提出了钕铁硼永磁盘式同步电动机的设计方案,为本文建模奠定了基础。文献[7]推导了 AMFPMSM 转子涡流损耗计算公式。文献[8]分析了三相正弦电压源驱动下的永磁同步电动机的涡流损耗变化情况。文献[9]分析了高速永磁电机转子涡流损耗的影响因素。文献[10]提出了一些措施来降低永磁体涡流损耗,如将永磁体结构由表贴式径向励磁改为内置式切向励磁、转子采用硅钢片叠加、永磁体采用分段结构等。本文结合变压器工程应用上的 TEAM

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51607157);天津市自然科学基金项目(15JCYBJC16400)

作者简介: 李 雪(1984—),女,博士研究生,研究方向为电机无速度传感矢量控制。

刘福贵(1972—),男,博士,教授,研究方向为工程电磁场与磁技术。

Problem 21 基准族中的相关知识,利用电磁屏蔽原理来降低转子涡流损耗。

1 AMFPMSM 模型建立与仿真

1.1 模型建立

本文研究对象为 11 kW、内定子、双转子结构的 AMFPMSM。其几何模型如图 1 所示。电枢绕组采用星形连接,可以削弱电流中 3 倍次数谐波,避免三角形连接的 3 次谐波环流所引起的附加损耗。其排列方式如图 2 所示,主要参数如表 1 所示。



图 1 几何模型



图 2 电枢绕组排列

表 1 AMFPMSM 主要参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定电压/V	380	电枢外径/mm	350
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500	电枢内径/mm	200
额定功率/kW	11	转子外径/mm	352
额定电流/A	14	转子内径/mm	198
工作频率/Hz	125	永磁体厚度/mm	12
元件匝数	90	磁轭厚度/mm	14
单边气隙长度/mm	2	定子厚度/mm	4

1.2 有限元仿真

AMFPMSM 转子涡流损耗受多种因素影响,如气隙内谐波磁场大小、材料自身电导率、谐波磁场在电机转子部分透入深度等。

透入深度定义为磁感应强度从导体表面值 B_0 衰减到 $0.368B_0$ (即衰减到表面值 e^{-1}) 的深度,

计算公式如式(1)所示。

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} \tag{1}$$

式中: δ ——透入深度;

ω ——频率;

μ ——绝对磁导率;

σ ——电导率。

在有限元网格剖分时考虑了透入深度和集肤效应的影响,在集肤效应层进行加密剖分,在集肤效应层之下可以相对较为稀疏。为得到更好的剖分网格,可以适当加密剖分层数。网格剖分模型如图 3 所示。



图 3 网格剖分

1.3 AMFPMSM 仿真及分析

1.3.1 空载仿真及分析

电机设定额定转速 1 500 r/min,不通电流,得到空载情况下电机瞬态磁场分布,如图 4 所示。

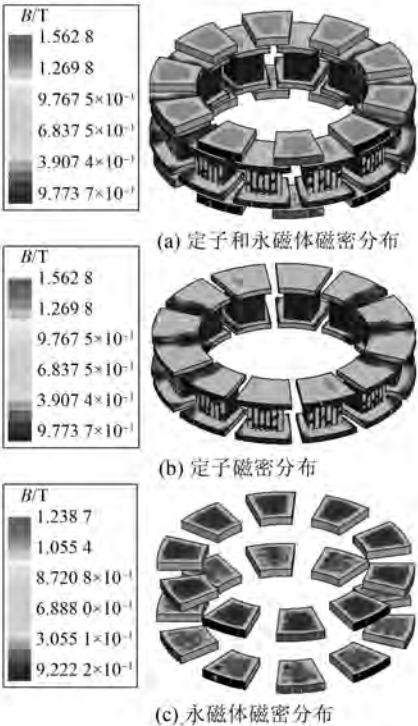


图 4 空载瞬态磁场分布

气隙磁密分布情况如图 5 所示。

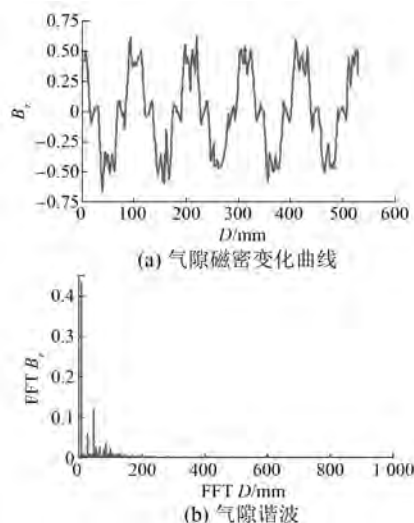


图 5 空载气隙磁密分析

通过图 4 可以看出, AMFPMSM 永磁体的磁密小定子铁心的磁密值, 定子铁心的磁密值最大, 达到 1.562 8 T。受边缘效应的影响, 永磁体中间磁密值较小, 边缘处磁密值较大。

由图 5 可以看出, 电机空载气隙磁密波形总体分布近似正弦波, 但是由于大量谐波存在, 气隙磁密波形已发生畸变。

1.3.2 负载仿真及分析

电机通入额定电流 14 A, 设定额定转速 1 500 r/min, 得到负载情况下电机瞬态磁场分布, 如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 负载情况下 AMFPMSM 各部位磁密值分布与图 4 空载情况下各部位磁密值分布大体相似。

此时, 定子产生的谐波磁场在永磁材料内部产生了 221.7 W 的损耗, 如图 7 所示。在转子(永磁体和磁轭)内部总共产生了 325.6 W 的损耗, 如图 8 所示。

2 电磁屏蔽对转子涡流损耗的影响

2.1 电磁屏蔽的机理

AMFPMSM 转子内侧进行电镀铜(电机内外径以及永磁体尺寸不变的情况下, 无论铜层厚度怎样改变, 主磁路磁阻不变), 当气隙谐波分量进入导电率较高的铜层之后, 会在其内部产生涡流。由于此涡流的反作用会使进入电机转子内部的磁

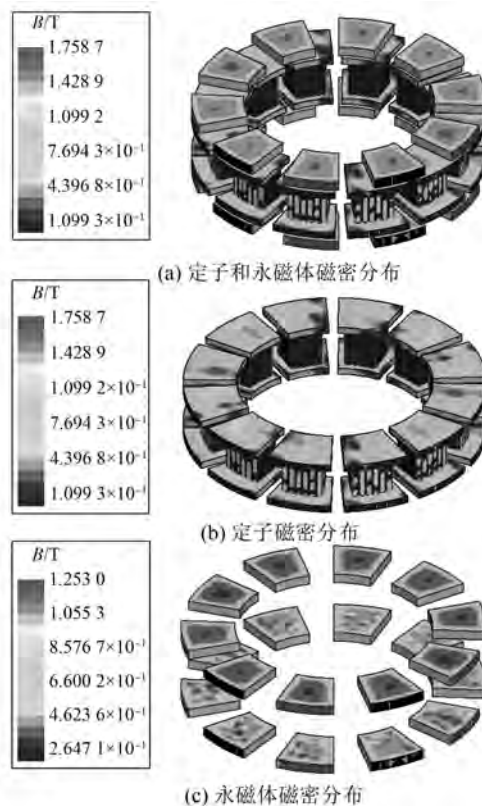


图 6 负载瞬态磁场分布

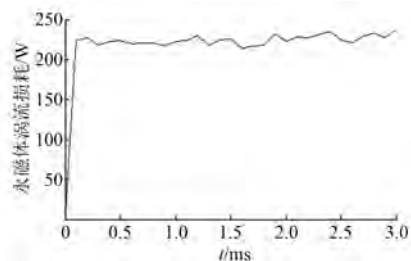


图 7 永磁体涡流损耗

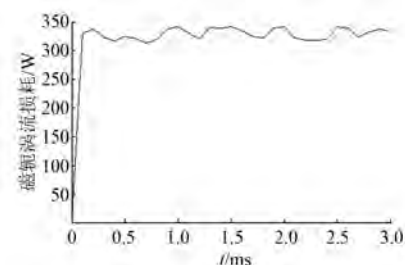


图 8 转子涡流涡流损耗

场谐波分量减少, 从而降低电机转子的涡流损耗。

有两点需要特别注意: 其一, 由于铜层中的涡流损耗会产生热量, 为了避免此热量直接传递于转子加重永磁体发热, 所以电镀铜层与电机转子表面

需要有隔热层隔离;其二,电镀铜层不能沿圆周连成一体,需要用绝缘层隔开,防止电镀层形成环流影响电机性能。AMFPMSM 电镀铜如图 9 所示。



图 9 AMFPMSM 电镀铜

2.2 电镀铜对转子涡流损耗的影响

结合谐波磁场透入深度理论,采用场路耦合时步有限元法对 AMFPMSM 电磁场进行了计算,得出电机通入额定电流 14 A、额定转速 1 500 r/min 状态下电机转子表面镀铜前后涡流损耗的变化情况,如表 2 所示。

表 2 AMFPMSM 电镀铜厚度与涡流损耗关系

铜层厚度/ mm	铜层损耗/ W	永磁体损耗/ W	磁轭损耗/ W	总损耗/ W
0	0	221.7	103.9	325.6
0.1	291.1	139.2	54.7	485.0
0.3	189.2	35.7	17.9	242.8
0.5	139.8	19.9	0	159.7
1.0	110.7	10.1	0	120.8

从表 2 中可以看出,随着转子表面镀铜厚度的增加,永磁体和磁轭涡流损耗总和是减少的,并且变化趋势不是线性关系。由此可知,对于电镀铜厚度不同导致涡流损耗变化机理的研究具有重要意义。

气隙磁密中 3 次谐波分量和 5 次谐波分量在铜材料中的透入深度为 1.0~1.5 mm,而 7 次谐波分量在铜材料透入深度不足 1.0 mm,因此当铜层厚度超过 0.5 mm 时,转子磁轭中已经没有谐波分量。

当铜层厚度为 0.1 mm 和 0.3 mm 时,涡流密度过于集中于铜层上(对应的铜层电流密度分布如图 10 所示),造成铜层中涡流损耗高达 291.1 W 和 189.2 W,使得 AMFPMSM 转子部分涡流损耗总和超过了电机未电镀铜之前的涡流损耗,因此为了避免转子表面镀铜产生不利影响,发挥转子表面镀铜优势,铜层需要保证有一定的厚度。本

文再进一步研究铜层涡流密度最大值随着铜层厚度变化的关系,如图 11 所示。

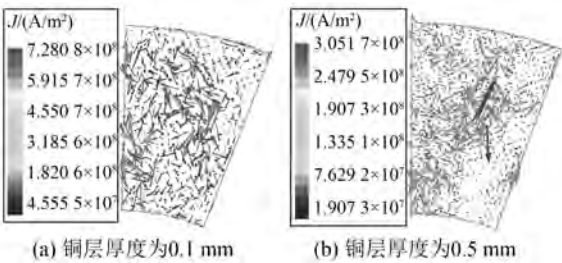


图 10 铜层电流密度分布

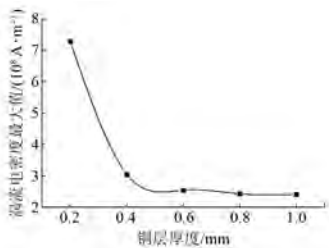


图 11 铜层涡流密度最大值随铜层厚度变化曲线

从图 11 中可以看出,当铜层厚度小于 0.4 mm 时,涡流密度最大值增加比较明显,并且随着铜层厚度的减小,呈现指数形式上升;当铜层厚度增加到一定程度,最大涡流密度变化不明显。因此,应充分考虑密度变化及结合转子机械强度和相应的工艺确定铜层厚度。

3 结 语

AMFPMSM 永磁体涡流损耗会引起永磁体温度上升,可能会使钕铁硼发生不可逆退磁。对这一问题以 1 台额定功率为 11 kW 的电机为研究对象,利用 Maxwell 三维电磁场有限元分析软件建立电机有限元模型,采用电磁屏蔽原理减小转子涡流损耗,效果显著,得出当铜层厚度达到 0.5 mm 时,永磁体涡流损耗显著降低,且转子磁轭中已无谐波分量。

【参考文献】

[1] BARRIERE O D L, HLIQUI S, AHMED H B, et al. An analytical model for the computation of no-load eddy-current losses in the rotor of a permanent magnet synchronous machine [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(6): 1-13.

(下转第 101 页)

- (12): 7-11.
- [3] 张从鹏, 邢庆辉. 基于 ARM Cortex-M4 的永磁无刷直流调速系统设计[J]. 微特电机, 2016, 44(1): 90-92.
- [4] 周竞捷, 邱梁骏, 袁梅, 等. 新型十二相永磁无刷直流发电机容错性能研究[J]. 微特电机, 2016, 44(8): 48-51.
- [5] 李凤祥, 袁野, 姜阳华, 等. 多相无刷直流电机变饱和柔性变结构控制器设计[J]. 控制工程, 2014, 21(1): 94-98.
- [6] CHEN Q, LIU G, ZHAO W, et al. Design and comparison of two fault-tolerant interior-permanent-magnet motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6615-6623.
- [7] 康敏, 孔武斌, 黄进. 电动汽车用五相感应电机容错控制[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(3): 1-6.
- [8] 王晓琳, 任新宇, 邓智泉, 等. 短路容错控制在多相无轴承永磁同步电机中的可行性分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 105-118.
- [9] 魏书荣, 何之倬, 黄苏融, 等. 海上双馈风电机组开路故障容错重构技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 83-89.
- [10] 张杰, 柴建云, 孙旭东, 等. 双三相异步电机反相高频注入无速度传感器控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 6162-6171.
- [11] BARCARO M, BIANCHI N, MAGNUSSEN F. Faulty operations of a PM fractional-slot machine with a dual three-phase winding [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(9): 3825-3832.
- [12] 唐红雨, 赵文祥, 姜庆旺. 五相磁通切换永磁电机滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(12): 51-58.
- [13] 朱鹏, 张晓峰, 乔鸣忠, 等. 五相集中整距绕组感应电机缺相容错控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(33): 131-137.
- [14] MOHAMMADPOUR A, SADEGHI S, PARSA L. A generalized fault-tolerant control strategy for five-phase PM motor drives considering star, pentagon, and pentacle connections of stator windings [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(1): 63-75.
- [15] BIANCHI N, BOLOGNANI S, PRE M D. Strategies for the fault-tolerant current control of a five-phase permanent-magnet motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(4): 960-970.
- [16] 刘国海, 程燃, 赵万祥, 等. 考虑三次谐波抑制的改进型五相永磁电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4212-4221.
- [17] DWARI S, PARSA L. An optimal control technique for multiphase PM machines under open-circuit faults [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(5): 1988-1995.
- [18] 孟彦京, 周鹏, 马汇海, 等. SVPWM 中的开路零矢量及其对磁链轨迹的影响研究[J]. 电气传动, 2016, 46(1): 19-23.
- [19] 叶佳卓, 陈广威, 周腊吾, 等. 基于预测 SVPWM 的永磁同步发电机直接转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(6): 32-35.

收稿日期: 2017-11-20

(上接第 71 页)

- [2] MECROW B C, JACK A G, MASTERMAN J M. Determination of rotor eddy current losses in permanent magnet machines [C] // Electrical Machines and Drives, Sixth International Conference on. IEEE Xplore, 1993: 299-304.
- [3] SERGEANT P, BOSSCHE A V D. Segmentation of magnets to reduce losses in permanent-magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(11): 4409-4412.
- [4] YAMAZAKI K, YU F. Effect of eddy-current loss reduction by magnet segmentation in synchronous motors with concentrated windings [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(2): 779-788.
- [5] 徐永向, 胡建辉, 邹继斌. 表贴式永磁同步电机转子涡流损耗解析计算[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 63-66.
- [6] DAI J, CHANG S. Design, analysis and improvement of a disc motor [C] // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2013: 75-80.
- [7] 李娟. 永磁体涡流损耗的有限元分析及其对电机性能的影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [8] 李虎, 蒋晓华, 毕大强, 等. 永磁同步电动机中永磁体的三维涡流分析[J]. 清华大学学报, 2009, 49(8): 1085-1088.
- [9] 田占元. 飞轮储能用高速永磁电机转子的涡流损耗[J]. 浙江大学学报, 2011, 45(3): 451-457.
- [10] 张炳义, 王三尧, 冯桂宏. 钕铁硼永磁电机永磁体涡流发热退磁研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2013, 35(2): 126-132.

收稿日期: 2017-11-06