

盘式永磁同步电机永磁体涡流损耗研究^{*}

刘福贵, 张建宇, 赵志刚, 杨乾坤
(河北工业大学 电气工程学院, 天津 300130)

摘要: 由于永磁体中存在涡流损耗, 这些损耗会以热量的形式散发出来, 使盘式永磁同步电机 (DPMSM) 内部温度升高。当温度过高时, 会引起电机运行性能降低。故针对永磁体涡流损耗进行深入研究, 对 DPMSM 的性能提高及优化设计具有重要意义。利用 Maxwell 三维电磁场有限元分析软件建立电机有限元模型, 在三相正弦电流源驱动下求解电机永磁体电磁场分布; 为减小永磁体涡流损耗, 对永磁体进行不同方向分割, 并对不同方向分割进行仿真对比, 得出横向分割为 3 块效果最佳; 在利用电磁屏蔽原理减小涡流损耗时, 先对其可靠性进行验证, 后利用 MATLAB 曲线拟合得出屏蔽层厚度的最优值。

关键词: 盘式永磁同步电机; 永磁体分块; 电磁屏蔽原理; 涡流损耗; 曲线拟合

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)07-0013-07

Study on Eddy Current Loss of Permanent Magnet for Disc Permanent Magnet Synchronous Motor^{*}

LIU Fugui, ZHANG Jianyu, ZHAO Zhigang, YANG Qiankun

(School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Because there exist eddy current loss in permanent magnet, it will give off in the form of heat. This will cause high temperature in disc permanent magnet synchronous motor (DPMSM). When the temperature is too high, it will cause the problem of degenerate performance of the motor. So conducted intensive studies on the permanent magnets of motor, and further research on these issues was of great significance to improve the performance of disc permanent magnet synchronous motor and its optimization design. In order to reduce the eddy current loss of permanent magnet, the methods of the permanent magnet segment and shielding layer was used. Maxwell, three-dimensional finite element analysis software, was used to establish the finite element model of the motor, reveal the electromagnetic distribution around permanent magnet and receive the average eddy current loss of permanent magnet when the motor was driven by three-phase sinusoidal current source. The method, segment in several different directions and simulation, was applied to show that the splitting into three pieces horizontally was the best by comparison, when the permanent magnets were segmented. Firstly, the principle's reliability should be verified, and then the optimal value of shielding layer thickness could be get by MATLAB curve fitting, when using the electromagnetic shielding principle reduce eddy current loss.

Key words: disc permanent magnet synchronous motor (DPMSM); permanent magnet segment; electromagnetic shielding principle; eddy current loss; curve fitting

0 引言

盘式永磁同步电机 (Disc Permanent Magnet

Synchronous Motor, DPMSM) 目前已广泛应用于机电一体化的产品中。它属于轴向磁场电机, 与传统的旋转电机相比, 这种电机的峰值转矩和堵转

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金 (51107026/51677052/51237005)

作者简介: 刘福贵 (1972—), 男, 博士研究生, 教授, 研究方向为工程电磁场与磁技术。

转矩高,转动惯量小,转矩质量比大,机电时间常数小,具有低速运行平稳等优越的动态性能。由于其具有短轴、薄型的特点,因此在电动汽车驱动和电池储能系统等许多场合有广泛的应用前景。但由于定子齿槽的存在,导致进入转子永磁体的磁场含有交变成分,从而在永磁体中会感应出涡流。转子的散热能力比较差,涡流会使永磁体发热,导致部分不可逆的退磁。因此,通过对 DPMSM 永磁体涡流损耗进行建模计算,分析涡流损耗的影响因素^[1],提出抑制或减小永磁体涡流损耗的方法显得尤为重要。

目前,对于盘式同步电机的研究很少,一般认为其模型与传统电机一样。但是由于它的磁通为轴向,所以与传统电机相比其磁路有明显的不同。文献[2]分析了无刷直流电机永磁体在不同分割数下的涡流损耗情况,得出随着永磁体分割数目的增加,涡流损耗有明显的减少,但未得出最佳分割块数。文献[3]对盘式定子无铁心永磁电机转子涡流损耗进行了研究,并论证其分块方法,但未得出怎样分割更佳。文献[4]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,转子采用硅钢片叠压;永磁体采用轴向分段结构,切割永磁体涡流的回路,在转子端面安装挡片来固定永磁体等。文献[5]提出一种将永磁体不完全分块的方法来减小转子涡流损耗。本文以一台 11 kW、内定子、双转子结构的 DPMSM 为例,利用 Maxwell 三维电磁场有限元分析软件建立电机有限元模型,在三相正弦电流源驱动下求解电机永磁体电磁场分布,为减小永磁体涡流损耗,对永磁体进行不同方向分割,并对不同方向分割进行仿真对比,为进一步减小涡流损耗,结合变压器工程应用上的 TEAM Problem 21 基准族中的相关知识,利用电磁屏蔽原理减少永磁体涡流损耗,并利用 MATLAB 曲线拟合得出屏蔽层厚度的最优值。这些电机安全、稳定、高效运行意义重大。

1 DPMSM 损耗

DPMSM 损耗主要包括定子损耗、转子损耗及机械损耗^[6-7]等。

1.1 定子损耗

由于定子有铁心,故定子损耗包括铁心铁耗

和绕组铜耗。传统上认为铁心内磁场只发生交变,仅产生交变铁心损耗,而实际上一部分铁心处于旋转磁场中,也产生旋转铁心损耗。在永磁同步电机中旋转磁场产生的损耗占总铁耗的比重也较大^[8]。当磁通密度幅值一定时,铁耗主要决定于频率,除此之外,电机的加工工艺、硅钢片材料等都是影响定子铁耗大小的重要因素。由此可见,铁耗的准确计算相当困难。对于一般铁磁材料,根据铁耗的产生机理,可以将永磁同步电机内部的铁耗分为磁滞损耗和涡流损耗。涡流损耗又可以分成经典涡流损耗(基本涡流损耗)和异常损耗(附加损耗)^[9]。对正弦磁密波形所产生的铁心损耗的计算,通常由磁通密度峰值与材料的损耗系数求取,计算中采用式(1):

$$P_{pu} = P_h + P_e = k(\alpha f B^2 + \beta f^2 B^2) \quad (1)$$

式中: P_{pu} ——单位损耗;

P_h ——单位磁滞损耗;

P_e ——单位涡流损耗;

k ——铁心叠片结构和工艺系数;

f ——电机频率;

B ——正弦磁密幅值;

α, β ——磁滞与涡流损耗系数。

式(1)广泛应用于电机的铁心损耗计算,并经长期实践验证,其在低频条件下能提供较准确的解出。绕组铜耗可以通过式(2)获得

$$P_{cu} = m I^2 R \quad (2)$$

式中: m ——电机的相数;

I ——绕组相电流的有效值;

R ——每相绕组的电阻值。

1.2 转子损耗

转子由永磁体和磁轭组成,故转子损耗只有永磁体及磁轭产生的涡流损耗。

由于定子齿槽的存在,气隙磁场含有谐波成分,转子旋转时永磁体与气隙谐波磁场发生相对运动,导致进入转子永磁体的磁场含有交变成分。由于钕铁硼有较高的电导率,会随着磁通的变化而产生涡流,从而产生涡流损耗。本文用有限元分析永磁体涡流损耗,将永磁体划分为有限个单元,通过求解每个小单元的磁感应强度,求出每个小单元的涡流损耗,再对涡流损耗求和,便可得出整个永磁体的涡流损耗。转子涡流损耗解析式为

$$P_{wl} = \pi^2 f^2 \sigma h^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n^2(a_n^2 + b_n^2)}{2} \tag{3}$$

式中： σ ——永磁体电导率；
 h ——永磁体磁化方向长度；
 n ——谐波磁密次数；
 $a_n、b_n$ ——各次谐波磁密幅值。

2 电机电磁场模型建立与仿真

2.1 DPMSM 有限元模型建立

本文研究的 DPMSM 几何模型如图 1 所示,绕组排列方式如图 2 所示,主要参数如表 1 所示。本文电枢绕组采用星形连接方式,此方式可以消除电流中三倍次数谐波,三角形连接的三次谐波环流会引起附加损耗,使电机效率降低、温升增加。

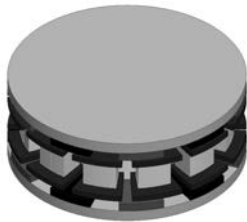


图 1 几何模型



图 2 绕组排列

表 1 DPMSM 主要参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定电压/V	380	定子外径/mm	350
额定转速/(r · min ⁻¹)	750	定子内径/mm	200
额定功率/kW	11	转子外径/mm	354
额定电流/A	22	转子内径/mm	196
工作频率/Hz	75	永磁体厚度/mm	9
极对数	6	磁轭厚度/mm	14
元件匝数	88	单边气隙长度/mm	1.5

2.2 DPMSM 有限元仿真

在完成三维几何模型建立和边界条件设置

后,要对模型中各部分附加材料属性、激励源等设置,需特别说明的是,模型两侧的永磁体充磁方向为轴向平行充磁;由于需要考虑集肤效应,所以需要在集肤效应层进行加密剖分,而集肤效应层之下的网络则可以相对较为稀疏,为得到更好的剖分网格,可以适当加密剖分层数。图 3 为求解域设置及网格剖分后的模型。



图 3 网格剖分图

2.3 DPMSM 有限元仿真结果及分析

2.3.1 DPMSM 空载下磁感应强度仿真结果分析

当对绕组施加零电流,并给电机设定恒定转速运行时,可以得到空载下电机的瞬态磁场分布情况,如图 4 所示。

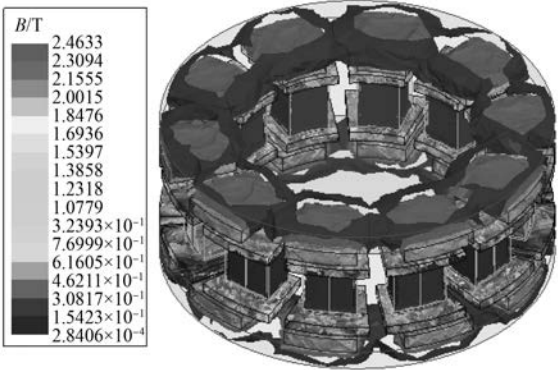


图 4 空载瞬态磁场分布

由图 4 可以看出,DPMSM 定子铁心磁密值最大,转子永磁体次之,磁轭最小;转子永磁体端部处的磁密差异较小,这是由边缘效应引起的,空载时 DPMSM 最高磁密达到了 2.463 3 T。

2.3.2 DPMSM 负载下磁感应强度仿真结果分析

当绕组通入正弦波电流时,便得到电机负载下的瞬态磁场分布,如图 5 所示。

由图 5 可以看出,DPMSM 转子各部位磁密值分布与图 4 大体相似,但是通入电流后的平均磁感应强度小于空载时的平均磁感应强度,通

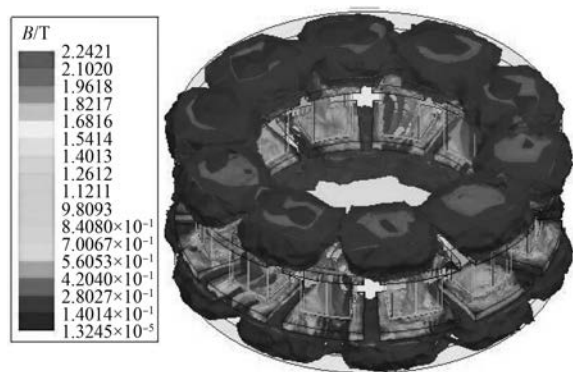


图5 负载瞬态磁场分布

过分析,这是由于电枢绕组在通入电流后产生电枢反应导致的,电枢反应会削弱永磁体产生的磁场。

2.3.3 负载下转子涡流损耗仿真结果分析

在正弦波驱动下,平均输出转矩为 $145 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、转速为 750 r/min 时,DPMSM 永磁体涡流损耗随时间变化的计算结果如图6所示。

从图6可以看出,转子永磁体平均涡流损耗是 206.85 W ,对于 DPMSM 来讲是不可忽视的。下文主要研究永磁体分块对涡流损耗的影响,以及分块后又添加屏蔽层对涡流损耗的影响。

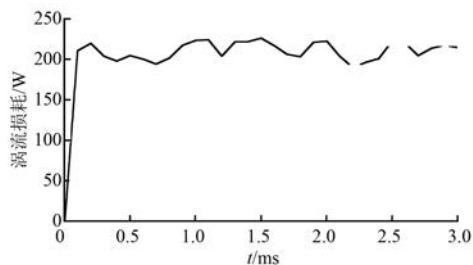


图6 永磁体涡流损耗随时间变化曲线

2.4 永磁体分块对涡流损耗的影响

永磁体分块降低永磁体涡流损耗的原理如下:将一块整体永磁体平均分割成多块,每块之间是绝缘层(为了不影响电机的气隙磁密,绝缘层要越薄越好),其阻断了原来的涡流路径。涡流损耗随着绝缘层数的增加而减小,但是由于制作工艺、永磁体有效尺寸及永磁材料利用率等因素的存在,永磁体分块数不能无限增大,设计时应根据具体要求及实际情况综合考虑。

2.4.1 永磁体横向分块对涡流损耗的影响

在保持平均输出转矩为 $145 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、转速为 750 r/min 不变的情况下,DPMSM 永磁体涡流损耗密度分布情况随永磁体横向分割数目增加而变化的仿真计算结果如图7所示。

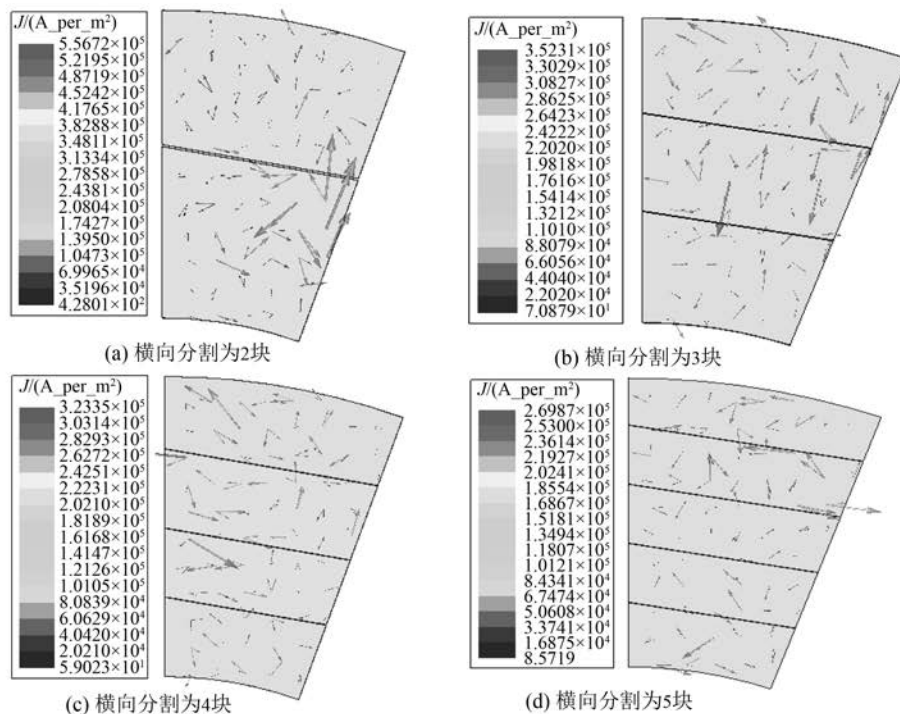


图7 横向分割涡流损耗密度分布情况

DPMSM 在上述恒定转矩及转速下,用有限元计算所得到的永磁体涡流损耗随分割块数增加的损耗值变化曲线如图 8 所示。

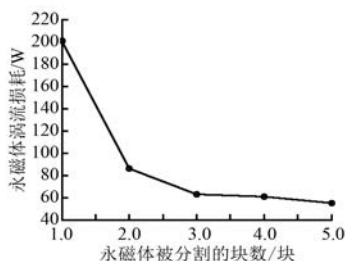


图 8 永磁体横向分成不同块数的涡流损耗变化曲线

通过图 8 可以直观看出使用永磁体分块的方法对永磁体涡流损耗减小方面有显著效果,分为 2 块较 1 整块时减小效果最为明显,分为 4 块虽比分为 3 块有所减小,但是效果已没有 3 块较 2 块时那么显著。考虑到制作工艺、永磁体有效尺寸变化及永磁材料利用率等因素的存在,永磁体横向分割为 3 块最为合适。

2. 4. 2 永磁体竖向分块对涡流损耗的影响

同样,在保持平均输出转矩为 $145 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、转速为 750 r/min 不变的情况下对 DPMSM 永磁体进行竖向分割。为了与横向分割进行对比,本文只分析竖向分割为 3 块和 4 块两种类型。涡流损耗密度分布仿真结果如图 9 所示,对应的涡流损耗

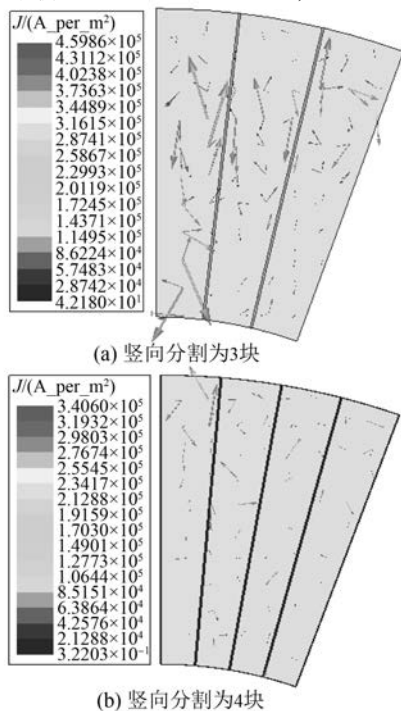


图 9 竖向分割涡流损耗密度分布情况

变化曲线如图 10 所示。

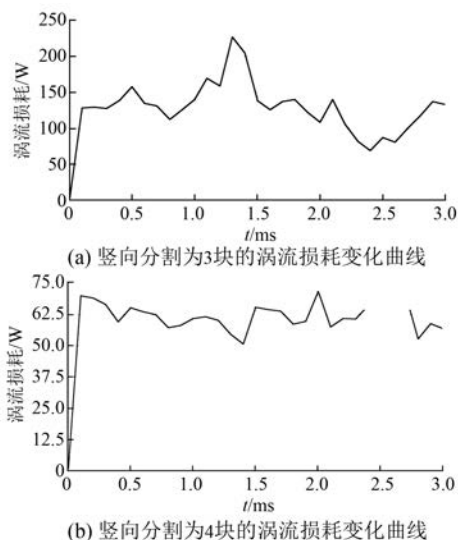


图 10 竖向分割涡流损耗变化曲线

由图 10 可以看出,竖向分割为 3 块时的平均涡流损耗为 127.95 W ,竖向分割为 4 块时的平均涡流损耗为 61.04 W 。

综上,对比其分割方向可知,使用横向分割对永磁体涡流损耗减小效果更佳。

2. 5 屏蔽层对涡流损耗的影响

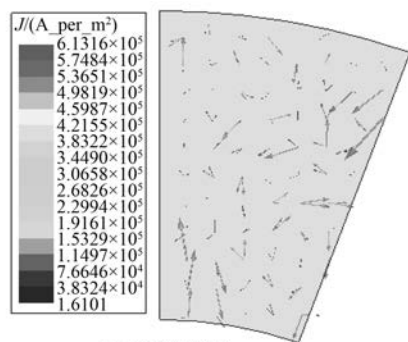
结合变压器工程应用上 TEAM Problem 21 基准族中的相关知识,利用电磁屏蔽原理于本文中,以减小永磁体涡流损耗。

在永磁体外部加一层与永磁体形状相似的薄铜片作为屏蔽层来减小永磁体的涡流损耗。当气隙谐波磁场分量进入电导率高的铜层后,在其中产生涡流,由于涡流的反作用使进入永磁体的气隙谐波分量减少,从而减小了永磁体的涡流损耗,且铜的热传导率高,利于热量的散失。

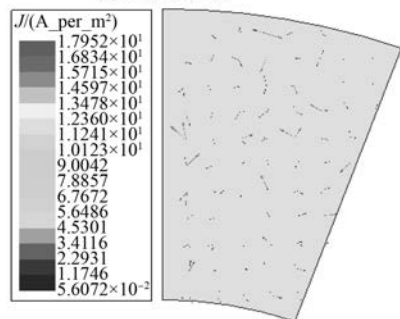
2. 5. 1 屏蔽层单独作用于永磁体

为了证实铜屏蔽层对永磁体涡流损耗减小真实有效,下面对未经分块的永磁体进行有限元仿真验证,如图 11 所示。

与未加屏蔽层时对比,永磁体涡流损耗密度明显减小,分布也均匀许多;反观铜屏蔽层上的涡流损耗密度虽然非常大(见图 12),但其尺寸很小,损耗数值不大。这准确地验证了屏蔽层能有效地屏蔽气隙谐波分量进入永磁体,使永磁体涡流损耗减小。



(a) 未添加铜层



(b) 添加铜层

图 11 未分块的永磁体涡流损耗密度分布对比

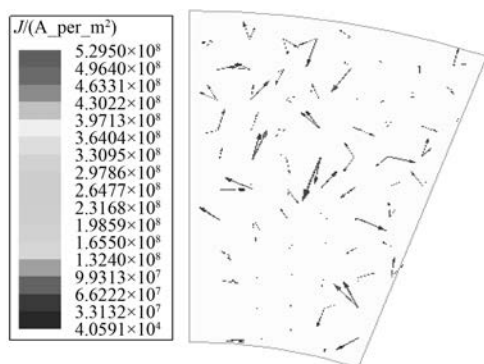


图 12 铜屏蔽层涡流损耗密度分布

2.5.2 分块和屏蔽层同时作用于永磁体

由于已用有限元计算的方式验证了永磁体分块和加入屏蔽层能有效降低 DPMSM 转子永磁体涡流损耗,本文做出分块和屏蔽层两种方法同时作用于永磁体上时,可以更大幅度减小永磁体的涡流损耗密度这样的设想。下面对这个设想进行有限元电磁场数值计算。以整个永磁体分3块为例,加上铜屏蔽层,仿真出永磁体涡流损耗密度分布(见图13)和涡流损耗值变化曲线(见图14)。

对比图7(b)与图13,分块和屏蔽层两种方法同时作用于永磁体上时,可以更大幅度减小永

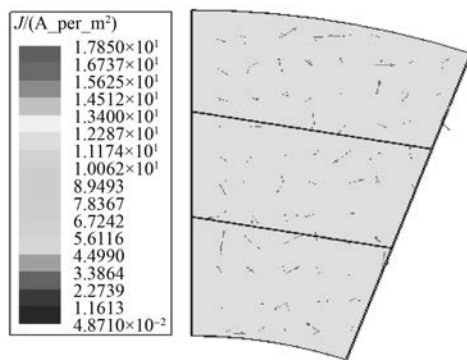
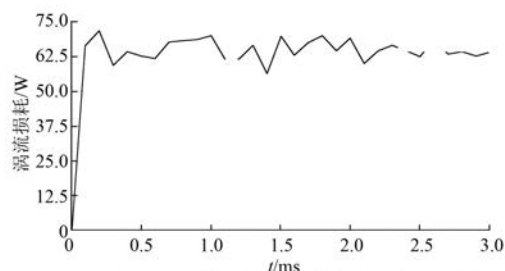
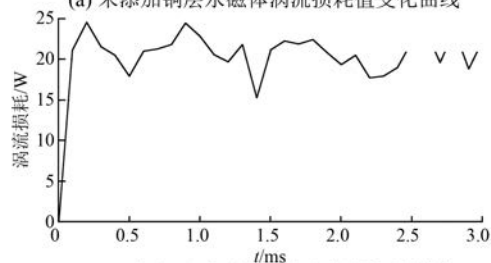


图 13 加屏蔽层永磁体涡流损耗密度分布



(a) 未添加铜层永磁体涡流损耗值变化曲线



(b) 添加铜层永磁体涡流损耗值变化曲线

图 14 分3块的涡流损耗值变化曲线对比

磁体的涡流损耗密度分布。通过图14(a)可以看出分3块未添加铜屏蔽层永磁体涡流损耗平均值为63.89 W,由图14(b)知添加铜屏蔽层后永磁体涡流损耗平均值为20.51 W,从而得出分块和屏蔽层同时作用于永磁体可以有效减小涡流损耗,论证了前文的设想。

2.5.3 屏蔽层厚度最优设计方案

为了使涡流损耗更小,屏蔽层的厚度 h_c 需要有一个最优值。根据电磁波理论,一般情况下以电磁波的波长作为屏蔽层的厚度,即

$$h_c = \lambda = 2\pi\delta \quad (4)$$

式中: λ ——电磁波波长;

δ ——透入深度。

这样,电磁场不能透过屏蔽体,从而对屏蔽装

置内外均起到隔离作用。但是由于电机各个部件实际尺寸及规格的影响,按照电磁波理论完全屏蔽谐波对永磁体的影响是不现实的。下面以屏蔽层厚度对涡流损耗影响用 MATLAB 曲线拟合得出最优方案。

拟合得出厚度约 0.41 mm 时对涡流损耗减小的效果最佳(见图 15)。用 Maxwell 软件对屏蔽层厚度为 0.41 mm 时有限元电磁场数值计算,得出永磁体涡流损耗密度分布(见图 16)及其涡流损耗值变化曲线(见图 17)。

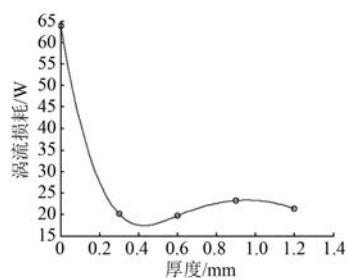


图 15 屏蔽层厚度对涡流损耗影响

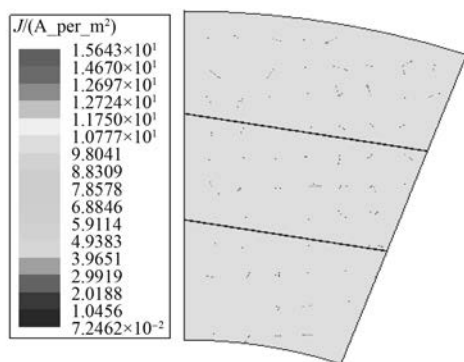


图 16 永磁体涡流损耗密度分布

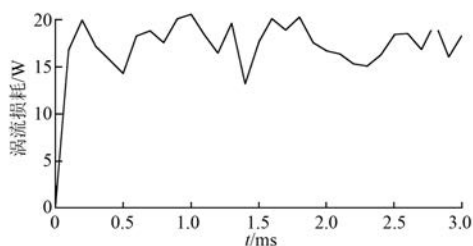


图 17 永磁体涡流损耗值变化曲线

通过 Maxwell 电磁场有限元分析计算,屏蔽层厚度为 0.41 mm 时确实对永磁体涡流损耗减小效果最好,其永磁体涡流损耗平均值为 17.31 W。

3 结 语

DPMSM 的转子散热能力比较差,永磁体涡流损耗产生的温升可能会使钕铁硼发生不可逆退磁。对这一问题以一台额定功率为 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,分析出横向分割为 3 块效果最佳,又利用电磁屏蔽原理减小涡流损耗时,用 MATLAB 拟合得出铜屏蔽层厚度为 0.41 mm 时对永磁体涡流减小效果最为显著。

【参考文献】

- [1] 吴梦华,李强.基于 Ansoft 的盘式电机磁场计算[J].机电技术,2014(4): 66-68.
- [2] ABBAS N M, KH K. Thermal analysis of BLDC motor with propose new arrangement for permanent magnets to magnet eddy current loss reduction[C] // Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2016: 1769-1774.
- [3] 王晓远,李娟,齐立晓,等.盘式永磁同步电机永磁体内涡流的有限元分析[J].微电机,2007,40(1): 5-9.
- [4] 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(社会科学版),2013,35(2): 126-132.
- [5] WILL D A, KAMPER M J. Reducing PM eddy current rotor losses by partial magnet and rotor yoke segmentation [C] // 2010 XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2010: 1-6.
- [6] 王晓远,李娟,齐利晓,等.永磁同步电机转子永磁体内涡流损耗密度的计算[J].沈阳工业大学学报,2007,29(1): 48-51.
- [7] 阳娜,张牧,郭宝忠,等.定子无铁心轴向磁场永磁电机温度场分析[J].仿真应用研究,2015,32(1): 259-264.
- [8] 张洪亮.永磁同步电机铁心损耗与暂态温度场研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [9] 尹惠.永磁同步电机损耗计算及温度场分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [10] LEE T Y, KIM Y J, JUNG S Y. Reduction of permanent magnet eddy current loss in interior permanent magnet synchronous motor according to rotor design optimization [C] // International Conference on Power Electronics and Ecce Asia, IEEE, 2015: 1712-1717.

收稿日期: 2017-03-06