

高性能铁氧体永磁电动机的实用化开发

The Developments of High Properties Permanent Magnetic Ferrite Motor

邓隐北，唐庆伟，韩雪雪

郑州天凯电气有限公司

摘要：稀土类永磁钢是电动机小型、高效率化必不可少的材料，但稀土永磁的价格波动大，且不能确保供货，这一印象令人难以忘却，故现正积极地研究开发着不用稀土永磁的永磁电动机。

作为无稀土永磁电动机的候补之一，利用价格较廉、又能稳定供给的铁氧体（ferrite）磁钢的嵌入式（内置式）永磁同步电动机（IPMSM），明电公司正在开发。本文，对铁氧体永磁电动机的效率测定，以及对减磁分析的实用化研讨，对考虑到生产性的铁氧体永磁电动机的性能评价等，均着眼于实用化的开发。今后，力图更佳转矩性能和效率提高的同时，还应增加对制造工艺过程及应用领域适用性的研讨，目的旨在实现产品化。

关键词：铁氧体永磁电动机，效率，减磁分析，后磁化

中图分类号：TM32 文献标识码：A 文章编号：1606-7517(2015)12-3-146

1 前言

近年来，随着对环境问题及节能化的要求，各个领域都在使用着可实现小型、高效的永磁同步电动机（PMSM）。但是，用于PMSM的稀土磁钢其价格波动大，还担心未来的原材料供给不稳定，因此，对替代技术的开发是面临的重要课题。明电公司为取代稀土类磁钢，采用了价格便宜，并可稳定供货的铁氧体（ferrite）磁钢，对嵌入式永磁同步电动机进行了开发，且见证了该电机具有与稀土类永磁电动机相同的性能。

本文，阐述了铁氧体磁钢的嵌入式永磁同步电动机的改进结构，并针对其实用化所实施的各种性能评价予以介绍。

2 基本模型

目前提出的铁氧体永磁IPM电动机的结构，如图1所示，表1列出该电机的各项规格参数。提案中的铁氧体永磁电动机，为扩大磁钢的表面积，采用了轮辐状配置的铁氧体磁钢A，为降低漏磁配置的铁氧体磁钢B，以及为减少d轴电感、增大凸极比而配置的铁氧体磁钢C，是由这几部分磁钢组成的磁极结构。在这一结构中因为充分有效利用了磁阻力矩（reluctance torque），在磁感应强度为稀土永磁的1/3的铁氧体磁钢电动机中，如图2所示，同样的电流、规格条件下，能达到约90%的转矩。表1列出了这次研制的电动机各项技术参数。

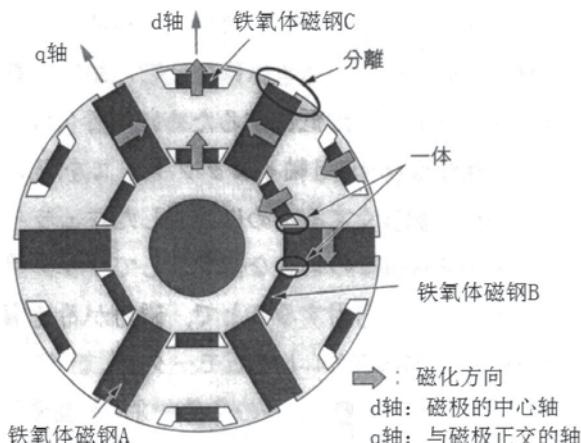


图1 铁氧体磁钢IPM电动机的结构

配置了轮辐状铁氧体磁钢A，为减少漏磁通铁氧体磁钢A的外周侧铁芯是分离的，磁钢A、B之间是由一狭窄的跨接桥连接的

2.1 效率评价

图3所示，为稀土永磁电动机和铁氧体永磁电动机的效率曲线图。从图中能确认的是：得到了两者最高效率几乎相同的性能。如上所述，在同样的电流条件下，由于铁氧体永磁电动机的转矩小，在低速大转矩范围内，增加铁氧体永磁电动机的电流，虽因铜损的增加，效率有若干降低的倾向，但在高速旋转范围内由于弱磁场的电流小，效率可得到提升。

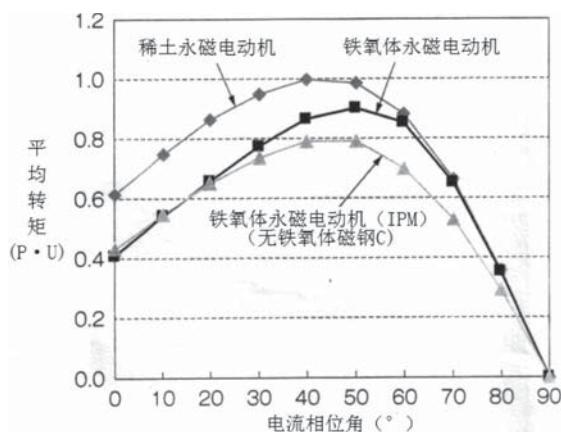


图2 转矩特性(分析结果)

通过磁阻力短的充分有效利用，能达到稀土永磁电动机约90%的转矩特性，在没有配置铁氧体磁钢C的情况下，磁阻转矩减少，约达到80%的转矩性能

表1 电动机的规格参数

项目	规格参数
磁极数	6
槽数	36
定子外径	Φ 220mm
铁芯叠层厚度	108mm
基本转速	1000rpm
最高转速	4000rpm
最高极限转速(转子强度极限)	7200rpm
电动机输出功率	10kw
剩磁密度(铁氧体磁钢)	0.45T

2.2 减磁分析

铁氧体永磁与稀土永磁比较，矫顽力约小到1/3左右，故对于不可逆退磁的评价是不能缺少的。图4为反磁场分布的分析结果。从图中已能确认铁氧体磁钢A的角部产生了大的反向磁场，减磁的影响，用式(1)列出的感应电压下降率进行评价，其结果如图5所示。

从图5可看到，在短时间通过额定电流的条件下，已能确认：减磁几乎达到可以忽视的程度，但通过电动机短时定额以上的过电流(变换器的最大电流)场合下，会产生约0.5%的电压下降(低温减磁)。

2.3 对后磁化的研讨

对于铁氧体永磁电动机的批量生产实用化来说，必须具备后磁化的生产工艺。迄今试制的电动机，是将单个磁化过的磁钢逐个插入到转子的铁芯内，再对插入转子铁芯的磁钢进行磁化的所谓后磁化过程中，按照不能完全磁化时的运转条件，有可能扩大不完全磁化的范围。须要对后

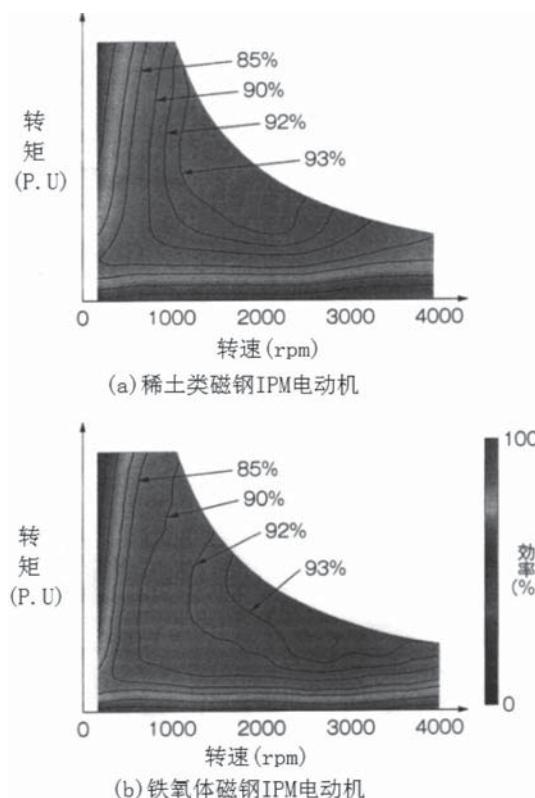


图3 效率曲线图(实测结果)

铁氧体磁钢电动机可达到稀土永磁电动机相同的最高效率，在高效率区则向高转速侧依稀偏移

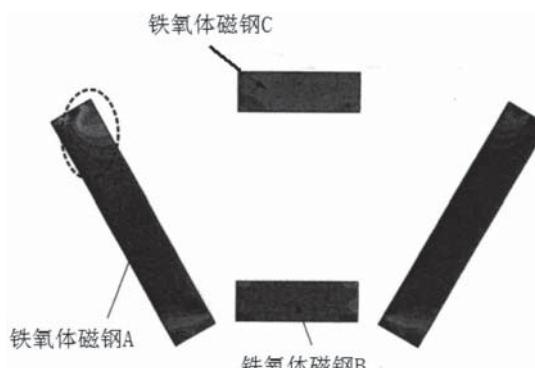


图4 反磁场分布的分析结果

通过最大电流时，铁氧体磁钢A的外周侧角部将产生过大的反磁场

磁化工艺工程的完全磁化进行研讨。

图6所示为现行的模型中，实施了后磁化时的分析结果，计算出各个磁钢在其配置方向产生的磁场，然后对后磁化进行评价。作为完全磁化的条件，就是对欲将磁化的磁钢，需施加3倍矫顽力的磁场，这是必要条件。由图6(b)可见到，轮辐状配置的磁钢A内径侧以及磁钢B的两端，未能满足这一条件。

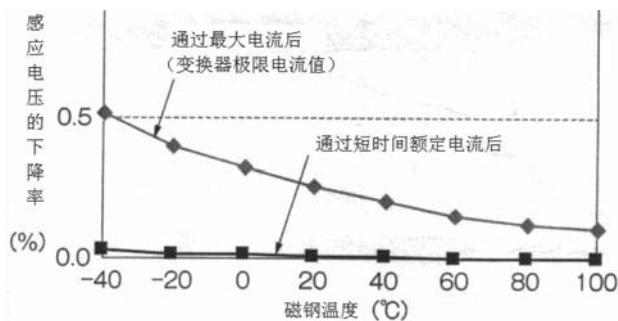


图5 感应电压的下降率

通过电动机的短时间额定电流以后，几乎未见到减磁的影响，而通过最大的电流后，会产生低温减磁。

3 改进方案的研讨

磁钢插入后为实现完全磁化，对磁钢的配置需要进行重新考虑。轮辐状配置的磁钢A，在转子的内径侧，因磁通难于通过，故将磁钢A缩短，向磁通容易通过的角度方向改变配置。此外，在磁钢B的两端和磁钢A的内径侧，设有磁钢磁通易于通过的空气层（壁垒层）。由此，作为面向量产实用化的方针之一，现在每一磁极配置的4块磁钢

全部是同一尺寸，为了制造、安装的方便实现了统一规格。

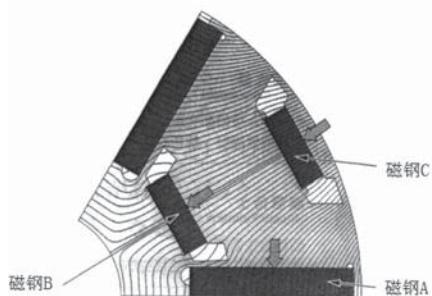
图7所示为在改进模型中实施[后磁化]时的分析结果。由于磁钢A、B、C各自产生的磁场均超过完全磁化所必需的磁场，故由改进的模型可判断[后磁化]的可能性。

4 结束语

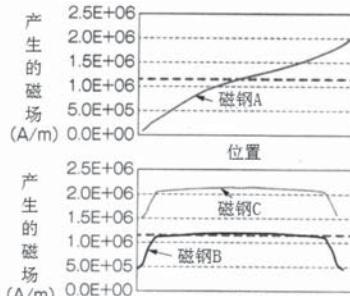
本文介绍了铁氧体磁钢IPM电动机的性能评价与实用化的有关研讨。在确保接近稀土永磁电动机的性能上，一方面有效地利用铁氧体磁钢的特点，一方面也考虑到生产性的廉价电动机，对其进行开发。

今后，通过进一步的转矩提升和效率改善，以及制造工艺过程的研讨，力图实用化的同时，又加上对试制的评价和实际操作应用的适用性研讨，以便将铁氧体磁钢IPM电动机不断推向实用化。

（原文出处：高性能フェライト磁石モータの実用化開発，Keisuke Matsuo,Daiki Matsuhashi,Hitoshi Fujihara,Isamu Takeda，《明电时报》P15-18。）

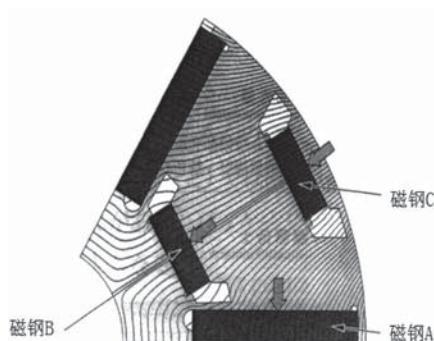


(a) 磁化分析模型

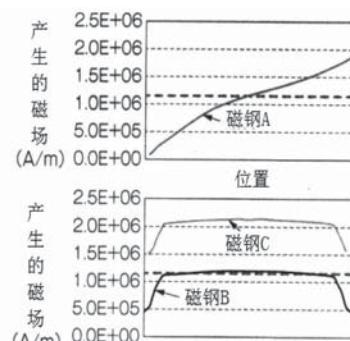


(b) 磁化分析结果

箭头所指示磁钢的配置方向。产生的磁场表示在这一配置方向的值，虚线表示所需的磁场，磁钢A、磁钢B均有不满足的地方。



(a) 磁化分析模型



(b) 磁化分析结果

图7 磁化分析结果(改进模型)

即使在转子的内径侧难以通过的磁通也能进行磁化，全部磁钢均可完全磁化。