

横向磁通开关磁阻电机转矩能力的分析

瞿遂春, 李华柏, 马晓光

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412008)

摘要: 设计了1台永磁屏蔽的横向磁通开关磁阻电机 (PM-shield TFSRM)。通过在定、转子极间装设永磁体来屏蔽气隙中的漏磁, 以提高输出转矩。采用三维有限元分析方法对电机的磁场进行了分析, 表明了永磁屏蔽的有效性。在相同电流通过时, 具有永磁屏蔽的横向磁通开关磁阻电机的平均转矩比没有永磁屏蔽的提高近1倍。

关键词: 横向磁通; 开关磁阻电机; 转矩能力; 永磁屏蔽; 漏磁

中图分类号: TM352

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)05-0010-04

Analysis on Torque Capability of Transverse-Flux Switched Reluctance Motor

Qu Suichun, Li Huabo, Ma Xiaoguang

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China)

Abstract: The advantages of TFSRM are high torque density per volume because resistance loss of end-turns at winding is absent and magnetic circuit is separated from electric circuit. We designed a kind of transverse flux switched reluctance motor with permanent magnet-shield (PM-shield TFSRM). PM-shield TFSRM has permanent magnet on the teeth of stator and rotor to shield from a leakage flux at airgap, so it can increase the torque output. After analyzing magnetic field of the motor by 3-D FEM, it shows the effect of the PM-shield, under the current, the average torque with PM-shield TFSRM increase nearly double than without PM-shield TFSRM.

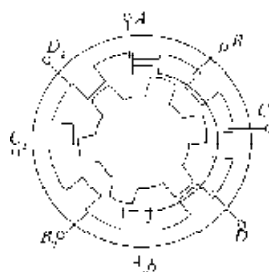
Key words: transverse flux; switched reluctance motor; capability of torque; permanent magnet-shield; leakage flux

0 引言

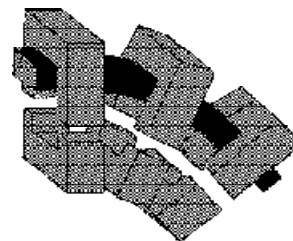
传统的开关磁阻电机 (SRM) 是沿径向产生磁场, 定子绕组和电机转子极争用同一个定子圆周空间, 电机的主磁路较长, 磁阻偏大, 定子绕组需要产生更大的磁势。如图1中 a) 所示。

横向磁通开关磁阻电机 (简称 TFSRM) 在定子上装设环形绕组, 环形绕组中的电流与转子运动方向一致, 因此它既具有传统开关磁阻电机结构简单牢固, 转子损耗小, 效率高等优点, 又具有横向磁通电机的特点, 即主磁路与电机运动方向垂直, 实现了磁路与电路结构上的解耦, 定子齿槽宽度不相互制约, 主磁路较短, 转矩密度高, 效率高等优点, 其结构如图1

中 b) 所示。



a) SRM 结构图



b) TFSRM 结构图

图1 SRM 和 TFSRM 结构图

Fig.1 Structure diagram of SRM and TFSRM

横向磁通开关磁阻电机可以通过增加电机的极数

收稿日期: 2008-09-01

作者简介: 瞿遂春 (1963-), 男, 湖南醴陵人, 湖南工业大学教授, 主要研究方向为新型电机及其控制;

作者简介: 李华柏 (1973-), 男, 湖南邵阳人, 湖南工业大学硕士研究生, 主要研究方向为新型电机及其控制。

和相数来提高输出转矩, 使其具有较高的转矩密度。因此, 在电动汽车^[1]和船舶推进^[2]等领域有较好的发展前景。但研究表明, TFSRM 的输出转矩并不与电机的极数和相数成正比, 这主要是由于随着极数和相数的增加, 极间距离减小, 导致极间漏磁增加, 漏磁产生的负转矩随之增加, 这将影响电机的出力。因此, 如何减小漏磁是进一步提高横向磁通开关磁阻电机输出转矩的关键所在^[3]。

1 开关磁阻电机转矩提升原理

从电机能量转换的角度, 开关磁阻电机的电磁转矩可表示为:

$$T_{em} = \frac{\partial W(i, \psi)}{\partial \theta} \tag{1}$$

式中: W 为电机的磁共能;

ψ 为磁链;

θ 为转子的位置角。

电机的转矩能力可以由 $i-\psi$ 特性曲线来反映^[4], 如图 2 所示。

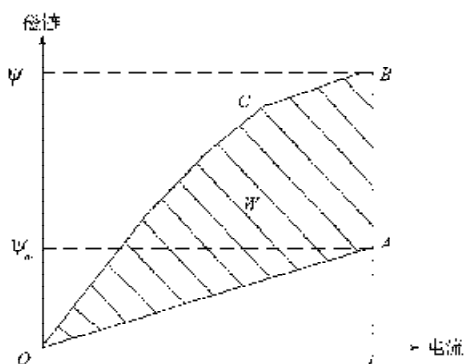


图 2 磁能曲线

Fig. 2 Magnetic energy curve

图 2 中, 直线 OA 表示转子齿中心线与定子槽中心线重合位置时的特性, 对应于最大磁阻位置。此时, 由于定、转子极间气隙较大, 磁路不饱和, 所以是直线。而曲线 OCB 代表定、转子磁极中心线对齐位置的特性, 对应于磁阻最小位置, 此时磁路饱和。因此, m 相开关磁阻电机的平均输出转矩可表示为:

$$T_{av} = H \cdot \frac{mN_r}{2\pi} \tag{2}$$

式中: N_r 为电机转子极数;

m 为相数;

W 为区域 $OACB$ 的面积。

在同样磁共能下, 增加电机的相数和转子的极数能有效地提高电机的输出转矩, 但由于传统的开关磁阻电机流过磁通的齿部与流过电流的线圈需占用同一截面, 极数和相数的增加将导致磁共能的减小, 三者之间存在相互的制约关系, 很难从结构上提高输出转矩, 采用横向磁通电机结构可有效地解决这一矛盾。

2 永磁屏蔽横向磁场开关磁阻电机的结构特点和磁场分析

图 3 为永磁屏蔽横向磁场开关磁阻电机的结构示意图。

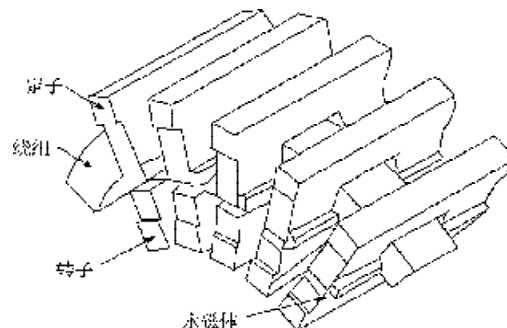


图 3 永磁屏蔽 TFSRM 的结构图

Fig. 3 Structure diagram of the TFSRM with PM-shields

图 3 中, 定子由凹字形铁心和环形集中绕组组成, 若干个凹字形铁心沿圆周均匀排放, 环形绕组放在凹槽中且与转子运动方向一致, 相邻相之间依次错开 $2\pi/m$ 电角度; 转子由与定子铁心数目相同的凹字形铁心组成, 每对定转子铁心形成一对极。因此, 电机结构简单, 绕组加工方便, 且绕组端部少。

TFSRM 原理上同传统开关磁阻电机一样, 也是按照磁阻最小原理进行工作的: 当在环形绕组通入电流, 就会在每个定子铁心中形成磁场, 与转子铁心形成闭合磁路 (每对定、转子铁心成为一对极), 按照磁阻最小原理拖动转子旋转, 直至定转子齿对齐; 依次导通其它相, 电机就可以连续旋转。与传统的开关磁阻电机不同, 由于 TFSRM 电机主磁路的方向位于与电机运动方向垂直的平面上, 因此, 可以沿轴向适当地放大槽口面积和齿部尺寸, 从而可以在保证磁共能不变情况下通过增加极数、或者沿轴向增加相数, 获得较高的输出转矩^[5]。

但是, 进一步的研究表明, TFSRM 的输出转矩并不与极数成正比, 当极数增加到一定数目时, 输出转矩不再增加, 甚至会有所降低, 这可以从图 4 所示的 TFSRM 简化二维磁路物理模型得到解释。

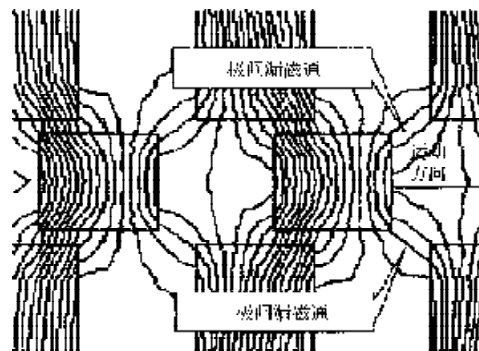


图 4 TFSRM 简化的二维磁路物理模型

Fig. 4 2-D simplified model of the simplified TFSRM

图4中,中间部分代表转子铁心,可以看出相邻齿极的漏磁将会对转子产生负转矩,并且极数越多,极间距离越小,极间漏磁影响越显著;除此之外与传统的开关磁阻电机一样,随着电流的增加,铁心饱和程度增加,也同样会使漏磁增加,造成输出转矩降低。因此,减小漏磁是进一步提高横向磁场开关磁阻电机转矩密度的关键所在。

为此,样机采用了双边永磁屏蔽的技术,它在定、转子极间分别放置了永磁体,并且使永磁体产生的磁通方向与漏磁方向相反,永磁磁通将阻止漏磁在极间通过,以此来提高输出转矩。图5给出了双边屏蔽TFSRM一个侧面永磁体的径向展开布置图,此时,假设该侧面磁通方向向上(需要说明的是,由于永磁体的极性固定,因此,为了能够屏蔽漏磁,定转子铁心中的磁通必须是固定方向的,即环形线圈中只能通单一方向的电流,这正适合于开关磁阻电机单方向电流运行的特点)。

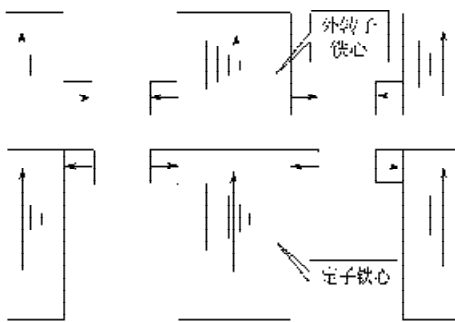


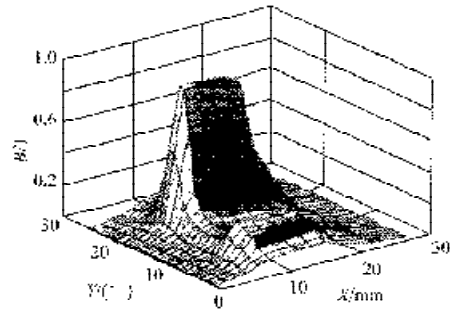
图5 永磁体极性布置径向示意图

Fig. 5 Arrangement and polarity of the PM

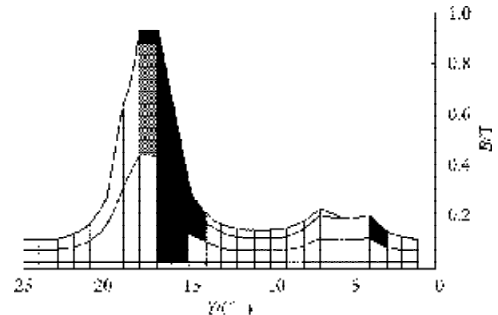
为更好地分析永磁屏蔽的效果,需要对电机进行磁场计算。由于TFSRM主磁路与电机运动方向垂直,是三维场问题,需采用三维有限元的方法来分析。本文采用了一种三维场分析的有效方法——三维等效磁网络法(3DEM N)。

三维等效磁网络法是将环形绕组产生的磁势集中在导体槽内部,并用一块永磁体来等效成为无旋场,满足了 $\text{rot}H=0$ 的条件。引用标量磁位 j ,是一种标量磁位求解方法,同时将求解区域进行六面体剖分,因此具有网格剖分方便、直观,求解的收敛性好等优点,是横向磁场电机研究的有效手段。磁场分析时,由于TFSRM电机各相各极独立,可以利用周期性边界条件,仅对1对极进行分析。

剖分中轴向上分为12块,切向24块,径向28块,并且切向为均匀等距剖分,轴向与径向为不等距剖分,0.6 mm气隙在径向上等距剖分为3块等。图6、7中a)为样机的的气隙磁密分布情况,其中 x 轴为电机轴向, y 轴为切向(即电机运动方向),通电电流为10 A。为便于比较,同时给出切向的二维图如图6、7中的b)。



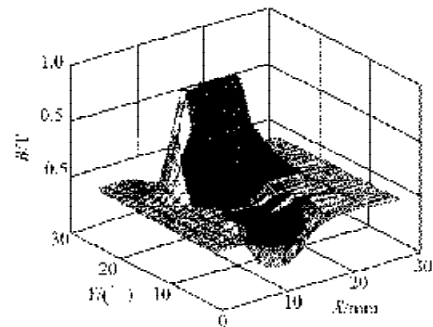
a) 三维气隙磁场分布



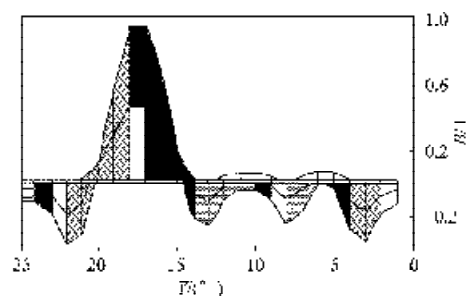
b) 切向气隙磁场分布

图6 无屏蔽横向磁场开关磁阻电机气隙磁密分布

Fig. 6 Airgap flux distributions of the TFSRM without PM shields



a) 三维气隙磁场分布



b) 切向气隙磁场分布

图7 永磁屏蔽横向磁场开关磁阻电机气隙磁密分布

Fig. 7 Airgap flux distributions of the TFSRM with PM shields

从图6、图7中可以看出:图6所示的无屏蔽样机极间漏磁比较大,而图7所示的双边永磁屏蔽TFSRM的极间漏磁明显地减小,达到了屏蔽漏磁的目的;从图6、图7中还可以看出,在该位置、该电流时,径向气隙磁密出现了负值,说明此时永磁体磁

通不仅抵消了极间漏磁, 而且还有一部分反向磁通将流经主磁路, 从而减小了该位置时的绕组匝链磁通。不同转子位置永磁磁通的贡献各不相同, 图 8 为

3 个特征位置时永磁屏蔽样机气隙磁密的三维磁场分布图。图 9 为绕组电流为 10 A 时, 一对极下电枢绕组匝链的磁通随转子位置的变化曲线。

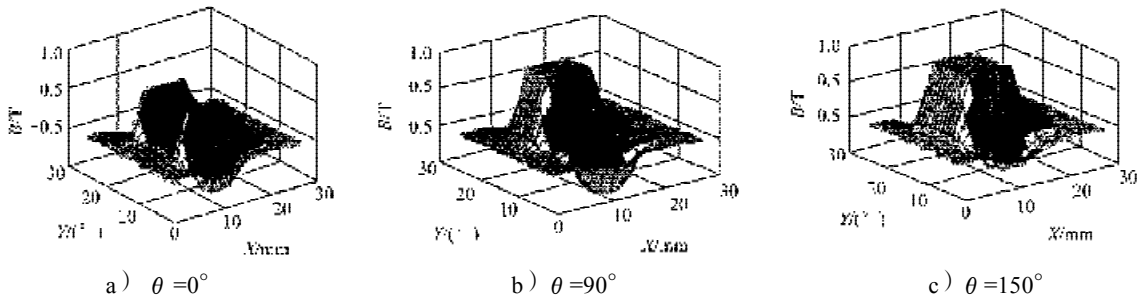


图 8 不同转子位置时永磁屏蔽横向磁场开关磁阻电机的气隙磁密分布

Fig. 8 Airgap flux distributions of the TFSRM with PM shields at different rotor positions

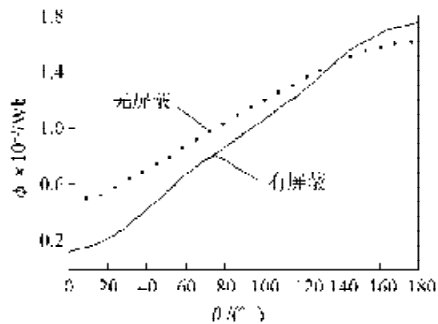


图 9 磁通与转子位置关系曲线

Fig. 9 Curves of flux at different rotor positions

从图 8、9 可以看出, 采用永磁屏蔽在减小漏磁的同时, 还能减小转子齿中心线与定子槽中心线重合位置时的磁链, 提高磁链变化率, 即对应于图 2 磁能曲线中的 A 点磁链值更低, 而 B 点更高。因此, 在相同转子位移时, 永磁屏蔽样机能释放出更多的磁场能量, 输出更高的电磁转矩。

图 10 表示电流是 10 A 时 2 台样机的静态矩角特性曲线。

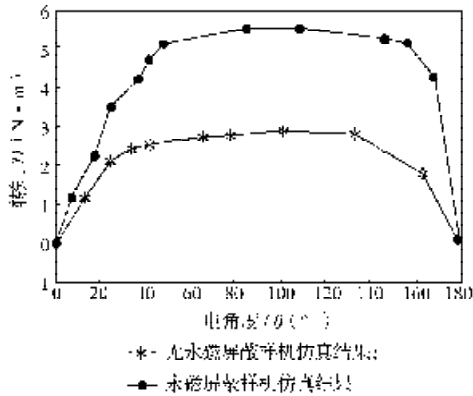


图 10 样机的矩角特性曲线

Fig. 10 Curves of torque-angle for prototypes

由图 11 可以看出: 在同样电流下, 双边永磁屏蔽

TFSRM 样机的静态平均转矩提高了近 1 倍, 转矩提升明显。

3 结语

本文根据横向磁通开关磁阻电机的结构特点, 设计了一台永磁屏蔽的横向磁通开关磁阻电机样机, 采用三维磁网络法对电机的磁场进行了分析和计算, 在此基础上分析了永磁屏蔽对电机磁场产生的影响和作用。通过在定、转子极间装设永磁体, 有效地屏蔽了漏磁通, 增加了磁通变化率。仿真结果表明, 具有永磁屏蔽的横向磁通开关磁阻电机比没有永磁屏蔽的输出转矩增加近 1 倍, 证明了研究方法的正确性, 具有较高的理论研究和推广实用价值。

参考文献:

- [1] Kruse R, Pfaff G, Pfeiffer C. Transverse flux reluctance motor for direct servodrive applications[C]// Proceeding of IEEE. [s.l.]: [s.n.], 2005: 655-662.
- [2] 陈永校. 微特直线电机[C]// 第七届中国小电机技术研讨会论文集. 上海: 出版社不详, 2002: 82-85.
- [3] Jeong Y H, Kang D H. A design of transverse flux motor with permanent magnet shield[C]// ISIE 2004. Pusan: [s.n.], 2004: 995-999.
- [4] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [5] Kang D H, Jeong Y H. A study on the design of transverse flux linear motor with high power density[C]// ISIE 2005, Pusan: [s.n.], 2005: 707-711.
- [6] 任贵勇, 王常虹. 开关磁阻电机的发电运行及其数字仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 29-32.

(责任编辑: 张亦静)