

高转矩密度横向磁场电机及其发展^①王 骞^② 邹继斌^③ 赵 玫 张 娟 李 帅

(哈尔滨工业大学电气工程与自动化学院 哈尔滨 150001)

摘 要 分析了横向磁场电机的电磁力产生原理,并对高转矩密度机理进行了讨论;总结了不同类型横向磁场电机的结构、特点及目前的发展状况,并对其控制技术进行了分析;针对电机在结构设计、性能分析等方面遇到的问题,探讨了横向磁场电机的研究方向和发展趋势。指出:横向磁场电机在结构上实现了电磁解耦,可以通过提高极对数来提高转矩密度,而且各相解耦使控制方法大大简化,因而特别适合于多极、低速大转矩的应用领域,应用前景广阔,但结构复杂、功率因数低等技术问题亟待研究解决。

关键词 横向磁场, 转矩密度, 直接驱动, 解耦, 脉振磁场

0 引言

永磁电机及其伺服系统具有体积小、效率高、动态特性好等优点,在工业驱动和伺服控制等领域有着广泛的应用。近年来,随着磁悬浮列车、舰船电力推动等大功率电气传动技术的发展,人们对高转矩密度永磁电机的需求日益迫切。提高电机的转矩密度是电机领域的重要研究课题。传统磁路结构的电机由于磁通经过的齿部和绕组所在的槽在同一截面上,其大小相互制约,因而使其转矩密度很难从根本上得到提高。虽可通过优化设计、选用高性能的磁性材料等来提高转矩,但其效果是有限的。若要大幅度提高转矩密度,必须从结构和原理上提出新的思想。合理改变磁路结构,使电负荷和磁负荷相互解耦,在一定范围内通过提高磁通变化率来提高电磁转矩的“横向磁场”结构的提出^[1],得到了国内外电机界学者的广泛认可和关注,同时各国学者对横向磁场电机(transverse flux machine, TFM)的理论和进行了有益的探索与研究^[2-5],促进了横向磁场电机的发展。横向磁场电机正在成为电机领域的一个研究热点。本文分析了横向磁场电机的电磁力产生原理和电磁关系,总结了不同类型横向磁场电机的结构、特点及发展现状,并对其控制技术进行了分析。在此基础上,探讨了横向磁场电机的研究方向及发展趋势。

1 横向磁场电机的结构及工作原理

1.1 横向磁场电机的磁路特点

在传统的径向磁场电机和轴向磁场电机中,主磁路均与电机运动方向在同一平面内,如果忽略端部效应,电机内的磁场可以用二维场来表示。与上述电机不同,横向磁场电机内的磁场是一个典型的三维场。图 1 为一台横向磁场电机的结构示意图。可以看出,在这种电机中,主磁路所在平面与其运动方向是垂直的,因而这种电机称为“横向磁场”电机。

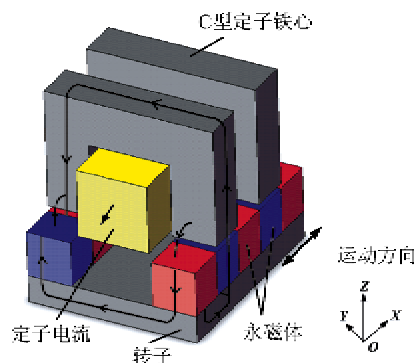


图 1 单边平板式横向磁场电机结构示意图

1.2 横向磁场电机电磁力产生机理分析

以图 1 所示的单边平板式结构为例来分析横向磁场电机的电磁力产生机理。该电机的定子由均匀分布的 C 型元件构成,各个 C 型元件间互差 360°电

① 国家自然科学基金(50777012)资助项目。

② 男,1982 年生,博士生;研究方向:新型横向磁场永磁直线电机及其驱动控制;E-mail: wangqian0818@163.com

③ 通讯作者, E-mail: zoujibin@hit.edu.cn

(收稿日期:2009-06-11)

角度,转子中的永磁体和转子铁芯均匀分布于转子上,相邻永磁体极性相反。

由于该电机的气隙磁场为 Z 方向,电流为 X 方向,而受力方向也为 X 方向,因而不符合 Lorentz 定律^[3]。然而,如果将定子电流产生的磁场定义为气隙磁场,永磁体用等效面电流来表示,仍然可以利用 Lorentz 定律来分析,此时 B 为 Z 方向,面电流 i 为 Y 方向,因而电机中将产生 X 方向的电磁力。具体分析如下:

对于 Y 轴方向上的两块永磁体,其受到的电磁力为

$$F = 2B \cdot I \cdot l \quad (1)$$

式中, I 为磁钢的等效面电流, $I = H_c h_m$; l 为磁钢 Y 轴方向的长度; B 为由定子磁动势 Ni_s 所产生的气隙磁密。若忽略铁心中的磁压降,且认为磁钢的相对磁导率为 1,则有

$$\begin{aligned} F &= 2 \frac{Ni_s}{2(\delta + h_m)} \mu_0 \cdot H_c h_m \cdot l \\ &= B_\delta \cdot Ni_s \cdot l \end{aligned} \quad (2)$$

式中, B_δ 为由永磁体产生的气隙磁密。

从式(2)可以看出,电磁力与垂直于运动方向(即 Y 轴方向)的长度成正比,而与 X 轴方向的长度无关,因而,可通过增大 U 形元件的个数来提高电机的电磁力。对于 X 轴方向长度一定的电机,增加元件个数意味着增大电机的极数,即在一定程度上可以通过增大电机的极数来提高电机的转矩密度/力密度^[5]。

1.3 横向磁场电机的结构特点

由以上分析知,同其它电机相比,横向磁场电机具有如下几个显著的结构特点:

(1)定子齿槽和电枢线圈在空间上互相垂直,实现了结构解耦,转矩密度高;

(2)各相均采用集中绕组,端部损耗小,效率高;

(3)各相之间没有耦合,便于电机的容错运行。

因为具有上述结构特点,横向磁场电机不仅工作可靠稳定,还能提供较高的转矩密度,因而特别适用于低转速、大转矩应用场合。

当然横向磁场电机也存在缺点,具体如下:

(1)电机结构比较复杂,需特殊的制造工艺,且电机机械强度较差;

(2)由于磁路的分布性,电机的漏磁较大,功率因数偏低;

(3)由于定子单元数和转子极对数相同,电机的定位力矩较大。

2 横向磁场电机结构形式

2.1 横向磁场电机的发展历史及基本类型

原则上每种径向磁场电机都有与之相对应的横向磁场电机。横向磁场感应电机的发展较早,其首次提出是在 1904 年,1934 年在德国出现了横向磁场电机的专利,英国的 Laithwaite 教授于 20 世纪 60 年代、70 年代对横向磁场直线感应电机进行了系统的研究^[6],然而,这种电机由于结构上的特殊性,无法采用短距、分数槽和正弦绕组等技术,使得电机内的谐波比较严重,因而在性能上无法与径向磁场电机相抗衡^[7]。1986 年,德国 Weh 教授将永磁体引入到横向磁场结构中,设计了第一台横向磁场永磁(同步)电机^[1],被认为是现代横向磁场电机的开端。本文的工作均是针对横向磁场同步电机进行的。

横向磁场电机从提出到发展至今,在结构上有多种实现形式。本文以永磁体的有无及安装方式来区分,即从平板式结构、聚磁式结构以及磁阻式结构,并结合当前研究的实际情况来分析横向磁场电机的几种典型结构形式,其研究现状可归纳为表 1 所示。总体来讲,国外起步较早,发展较快;而中国研究较晚,发展较慢。

表 1 横向磁场电机国内外研究现状

电机结构	国外研究单位	中国研究单位	相关研究成果
平板式结构	①RWTH, Aachen, Germany	上海大学 华中科技大学	Aachen 学院开发出 40kW 样机
	②University of Southampton, UK		KTH 开发出 2000N 直线型样机
	③KTH, Sweden		华中科技大学开发 200W 小功率电机
聚磁式结构	①Rolls-Royce IRD Ltd, UK	上海大学 沈阳工业大学 清华大学	Rolls-Royce 研制出 3MW 电机
	②Braunschweig University, Germany		Calgary 大学提出无源转子型结构
	③University of Calgary, Canada		Delft 开发兆瓦级 TFM 用于波浪能发电
	④Allison Transmission, GE, US		上海大学开发 1.5kW、公共连接铁心样机
	⑤Delft, Netherlands		沈阳工业大学开发 40 极、5kW 样机
磁阻式结构	①KERI, Korea	上海大学 台湾国立中山大学	KERI 研究组提出永磁体屏蔽型 TFM
	②University of Cluj-Napoca, Romania		

2.2 平板式结构

在平板式结构中,永磁体平铺于转子轭上,而定子是齿槽铁心结构,因而该种结构是单凸极式的,它可分为单边布局 and 双边布局两种形式。

单边布局结构是在转子一侧安装定子铁心,如图 1 所示,其结构简单,机械鲁棒性好。双边布局结构是在转子两侧均安置定子铁心,它充分利用了转子磁钢,因而转矩密度有显著提高。

瑞典皇家工学院早期的样机如图 2(a)所示,它采用三相同圆周排列结构^[8],磁极端面是平面,易于加工,但线圈安装工艺性较差。图 2(b)为 Sadarangani 教授最新提出的自由活塞用横向磁场永磁直线发电机的结构示意图^[9]。在该电机中,绕组为沿圆周三相分布排列的集中绕组,定子铁心沿轴向多段排列,各段铁心极性相同;转子由沿轴向极性交替排列的永磁体组成。由于定子采用了铁心叠片结构,因而制造工艺比较简单。

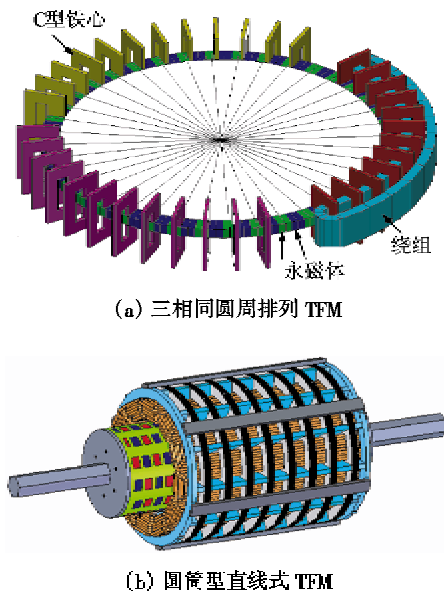


图 2 瑞典 KTH 大学样机

在国内,华中科技大学辜承林教授在德国 Henneberger 教授设计的结构^[10]的基础上,对其进行了优化和改进^[11],其结构如图 3 所示。该新型结构是将永磁体磁化方向从径向改为轴向,采用单排永磁体磁极实现了与单边定子结构等效的磁路形式,从而使每相永磁体数目减半,可明显提高电机的转矩密度和功率密度。

2.3 聚磁式结构

在聚磁式结构中,转子永磁体的充磁方向与气隙平行,相邻的永磁体极性相反,其所产生的磁通共

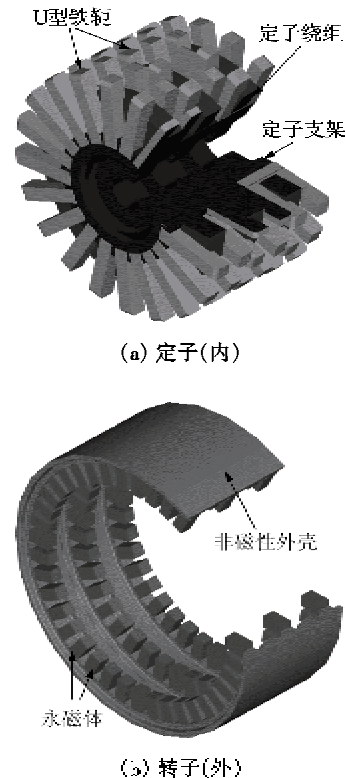


图 3 永磁体轴向磁化的 TFM 定、转子示意图

同流入永磁体之间的铁心中,“聚磁”后沿径向或轴向进入定子,因此使磁通密度可以突破永磁体剩磁的限制,从而获得很高的气隙磁密。

英国 Rolls-Royce 国际研究发展中心于 1997 年研制出了 2MW 聚磁式横向磁场电机,其结构如图 4 所示^[12]。它是在 Web 原型机的基础上,将 C 形铁心扭斜一个极距以使其两端与不同极性磁极相对应,从而采用单边永磁体结构实现了与 Web 原型机等效的磁路形式。

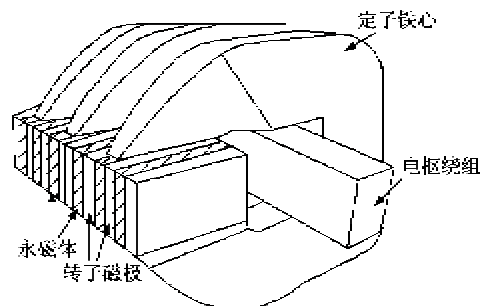


图 4 Rolls-Royce 公司样机结构

上述结构的电机转子含有永磁体磁极,是有源的,它存在加工困难、机械结构性差等问题。1999 年加拿大 Calgary 大学的 Hasubek 等设计了无源转子型横向磁场电机,其结构如图 5 所示^[13]。它是将转子上的永磁体移到定子上,同时将转子铁心倾斜一

个极距,形成无源转子结构,它减轻了转子振动等对永磁体的影响,并增强了转子机械结构的可靠性。

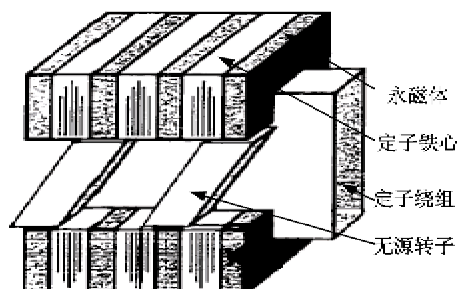


图5 无源转子型 TFM 结构

在国内,上海大学特种电机研究室江建中教授领导的课题组在 20 世纪 90 年代初率先开展了横向磁场电机的研究工作,编制了相应的分析和设计软件,奠定了良好的基础;近年来设计了多种新型拓扑结构的横向磁场电机,取得了丰硕的研究成果。图 6 是上海大学研制的两相聚磁式横向磁场电机的结构示意图^[14]。

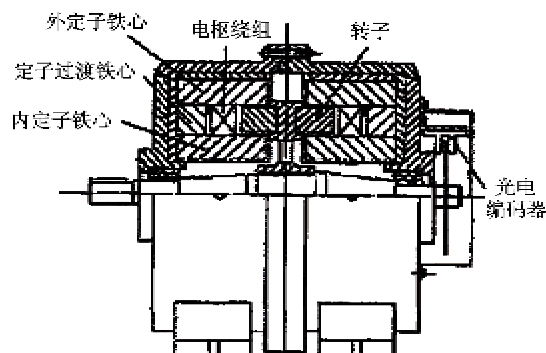


图6 上海大学两相横向磁场电机结构示意图

沈阳工业大学唐任远教授研制的单边聚磁式结构如图 7 所示,其转子永磁体采用三面墙式结构,以抑制相邻磁极间的漏磁。文献[15]研究了电机结构

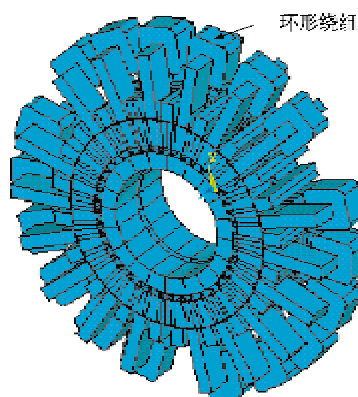


图7 沈阳工业大学单边聚磁式 TFM 结构示意图

参数对电机的影响趋势,给出了电机的设计规律;为了减小定子侧面涡流损耗,提出硅钢片卷绕定子铁心结构,简化了加工工艺。

2.4 磁阻式结构

磁阻式横向磁场电机的结构和平板式很相似,只是它的转子部分不放置永磁体,其工作原理与反应式步进电机相似,遵循“磁通沿着磁导最大的路径闭合”的原则。

韩国 KERI 大学横向磁场研究组提出了一种漏磁通屏蔽方法^[16],它是在电机的定子侧装设永磁体,利用与漏磁通方向相反的永磁体磁通来屏蔽漏磁通,从而可提高电机的输出转矩。

罗马尼亚 Cluj-Napoca 技术大学提出了一种新型的磁阻式横向磁场电机^[17],其结构如图 8 所示。它是在图 5 的基础上,将永磁体移到动子上,形成了无源定子的结构形式。

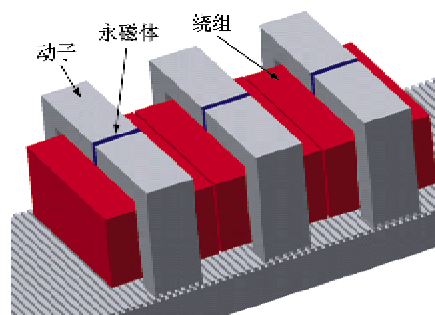


图8 无源定子型磁阻式横向磁场电机

在中国,上海大学^[18]、台湾国立中山大学^[19]、北京交通大学等也对横向磁场磁阻电机进行了相关的研究,取得了一些有益的成果。

2.5 各种结构的比较

在横向磁场电机的各种结构中,单边平板式和磁阻式比较简单,加工制造容易,整个机构的机械强度较高,但力矩性能稍差;双边平板式和聚磁式的出力能指标要大于前两者,但它们需要辅助磁路,结构较复杂,相应地,整个机构的机械鲁棒性较差。

3 横向磁场电机控制技术

目前,国内外对横向磁场电机的研究主要集中在电机的结构、三维磁场分析方面,对电机控制系统的研究比较少。深入理解横向磁场电机的数学模型和控制策略,有助于研究和建立横向磁场电机驱动系统的一般控制规律,并进一步推动横向磁场电机的发展。

相关研究表明,虽然横向磁场电机的各相之间互相解耦(这与传统电机不同),但在本质上,横向磁场电机仍属于同步电机的范畴,因而同步电机的控制方法如矢量控制、直接转矩控制等方法以及现代控制理论的算法如模糊控制、神经网络控制等,仍旧可以应用到横向磁场电机中,并且各相间的解耦使控制更加灵活方便,可以通过控制绕组电流来满足不同驱动系统对转矩密度、效率和功率因数等的要求。

文献[20]提出基于模糊-神经网络的方法对横向磁场电机进行控制,将电机的非线性转矩作为转速和位置的扰动因素,采用反馈线性化技术和H_∞控制对其进行补偿,实现了横向磁场电机的自适应跟踪控制。

上海大学王建宽博士从电机设计和电磁场分析出发,通过建模和仿真研究,设计了横向磁场电机的驱动控制系统:根据TFPM各相独立的特点,提出了一种基于标量电流概念的转矩控制;设计了基于模糊自整定PI调节器的双闭环控制系统,使系统具有较好的动静态性能以及鲁棒性;采用混沌SPWM技术,有效降低了横向磁场电机驱动系统的电磁干扰^[21]。

此外,台湾国立中山大学刘承宗博士对横向磁场直线型开关磁阻电机的驱动控制策略进行了研究,基于模糊控制理论实现了二维空间速度与悬浮力的同步控制^[22]。

4 横向磁场电机的研究方向

由于横向磁场电机在本质上属于同步电机,因此,对横向磁场电机的分析和设计,需要继承与借鉴研究同步电机(尤其是永磁同步电机)的一般方法、原理以及成果。对横向磁场电机研究的不断深入和新的研究成果的诞生,也将有力促进该种电机及整个电机学科的发展。然而,由于横向磁场电机与传统电机在结构和原理上有很大不同,因而对其分析、设计的研究也有不同于传统电机的新特点,主要表现在以下几个方面:

(1) 结构与工艺的改进

复杂的结构和工艺是制约横向磁场电机发展的主要原因之一,简化磁路结构和制造工艺一直是横向磁场电机的研究热点。因而,对传统永磁同步电机、永磁直线电机、爪极式永磁同步电机等结构进行深入分析,结合永磁材料、铁心软磁材料、软磁复合

材料(SMC)等技术的最新发展,探索合理的横向磁场电机结构,有效提高横向磁场电机的性能并简化加工制造工艺,是横向磁场电机的一个重要的发展方向。

在电机结构研究方面,一种思路是提出新型的结构,另一种思路是对原有结构进行改善。例如针对永磁体用量大的缺点,提出通过增加永磁体单位体积产生的空载主磁通来减少永磁体的用量;针对电机漏磁偏大的缺点,在定子齿侧加上永磁体罩来减少电机的漏磁。另外,提出一些提高电机性能和方便电机制造的新型拓扑结构^[23]。

在材料及加工工艺方面,近年来SMC发展较快。SMC使得三维磁路结构的实现成为可能,从而突破了传统电机受叠压结构的限制^[24,25]。SMC定子在简化工艺的同时,还大大减小了铁心的高频涡流损耗,可有效提高电机的效率。

(2) 分析与设计方法的发展

横向磁场电机是一项新的研究课题。由于结构上的特殊性,与传统电机相比,该电机产生电磁力的机理、分析与计算方法均有其特殊性,因此在丰富电机拓扑结构的同时,也对电机分析与设计的理论和方法提出了新的要求。

在分析方法上,由于横向磁场电机内的磁场是典型的三维场,因而可采用数值计算软件对电机的三维场进行计算,采用瞬态联合仿真软件对不同横向磁场结构进行分析,探索各个尺寸、参数对电机性能影响的一般规律,建立横向磁场电机静、动态特性分析的一般方法。

电机的电磁参数是分析电机性能的基础。在电磁参数计算上,一方面,由于横向磁场电机结构的复杂性、磁场的非线性及其典型的三维气隙磁密和场矢量分布,使电机的参数计算和性能分析具有相当难度。另一方面,随着单机容量的日益增大,电机运行过程中的磁饱和和涡流等因素对参数的影响越来越严重,这些都是采用传统的路的方法很难计及的。因此,需从电磁场理论出发,采用数值方法来精确地计算电磁参数^[26]。

(3) 转矩脉动的分析与抑制

由于横向磁场电机的极数较多,运行速度不高,因此低速运行时的平稳性是一项非常重要的性能指标。然而,由于电机内脉动转矩的存在,使得电机的运行特性恶化,严重影响了横向磁场电机在直接驱动伺服系统中的广泛应用。因此,在综合分析转矩中各种脉动成分的基础上采取有效的措施来抑制转

矩脉动,成为提高横向磁场电机驱动性能的关键。通常抑制转矩脉动的方法主要有两种,一种是进行电机本体的优化设计^[27,28],另一种是从电机控制入手,通过调整定子绕组的电压或电流波形对脉动转矩进行补偿。

从本体优化设计出发,由于其定、转子和绕组的结构特点,使之无法采用短距和分数槽技术来消除谐波,需要在结构上进行改进来削弱脉动转矩。

从电机控制策略出发,可采用电流波形预编程、特定谐波注入技术、重构转矩变量以实现转矩闭环等方法来抑制电磁转矩中的定位力矩、纹波力矩及换相转矩成分。

(4)功率因数的改善

同传统同步电机相比,横向磁场电机的功率因数偏低,会严重污染电网^[29]。因而,在满足应用场合对横向磁场电机转矩密度、效率等要求的前提下,探寻改善功率因数的电机本体结构及相应的驱动控制策略,同样也是横向磁场电机的研究方向和热点之一。

(5)转子磁极涡流损耗的分析与抑制

横向磁场电机的槽口较大,因而由主极所产生的谐波磁场较为严重^[30],另外,这种电机各相解耦,电机内的电枢反应磁场为空间独立的脉振磁场,磁场中的高次时间谐波和高次空间谐波较为严重。以上两个因素使得横向磁场电机转子磁极内的涡流损耗较大。由磁极涡流损耗引起的温升将导致永磁体的退磁,并导致电机效率降低,性能变差。因此,需采取合适的措施来有效抑制转子磁极涡流损耗。

5 结 论

纵观国内外研究发展现状,由于横向磁场电机在结构上实现了电磁解耦,可以通过提高极对数来提高转矩密度,因而特别适宜于多极、低速大转矩的应用领域。但是横向磁场电机还存在不少理论和技术问题亟待解决,诸如结构复杂、功率因数低等,因而在理论和技术上对其进行全面深入的研究是十分必要的。横向磁场电机具有转矩密度高和控制特性好的优点,它在国民经济和国防等领域将有广阔的应用前景,并将会带来显著的社会效益和经济效益。

参考文献

[1] Weh H, May H. Achievable force densities for permanent magnet excited machines in new configurations. In: Proceed-

ings of the International Conference. on Electrical Machines, Munchen, Germany, 1986. 1107-1111

- [2] Anpalaham P. Design of Transverse Flux Machines Using Analytical Calculations and Finite Element Analysis: [Licentiate thesis]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 1999.1-17
- [3] Harris M R, Pajooman G H, Abu S M. Performance and design optimization of electric motors with heteropolar surface magnets and homopolar windings. *IEE Proc Electr Power Appl*, 1996, 143(6): 429-436
- [4] Zou J B, Wang Q. Fundamental study on a novel transverse flux permanent magnet linear machine. In: Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems, Wuhan, China, 2008, CD-ROM
- [5] Arshad W M, Backstrom T, Sadarangani C. Analytical design and analysis procedure for a transverse flux machine. In: Proceedings of the IEEE Electric Machines and Drives Conference, Massachusetts, USA, 2001.115-121
- [6] Laithwaite E R, Eastham J F, Bolton H R, et al. Linear motors with transverse flux. *Proc of IEE*, 1971, 118: 1761-1767
- [7] Arshad W M. A Low-leakage Linear Transverse-flux Machine for a Free-piston Generator; [Ph.D dissertation]. Stockholm, Royal Institute of Technology, 2003.65-66
- [8] Anpalahan P, Soulard J, Nee H P. Design steps towards a high power factor transverse flux machine. In: Proceedings of the European Conference on Power Electronics and Applications, Graz, Austria, 2001.1-6
- [9] Cosic A, Sadarangani C, Carlsson F. A novel concept of a transverse flux linear free-piston generator. In: Proceedings of the 5th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, Kobe-Awaji, Japan, 2005, CD-ROM
- [10] Henneberger G, Bork M. Development of a new transverse flux motor. Leicester University, UK: New Topologies for Permanent Magnet Machines (Digest No. 1997/090), IEE Colloquium, 1997
- [11] 陈金涛, 辜承林. 新型横向磁通永磁电机研究. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 155-160
- [12] Mitcham A J. Transverse flux motors for electric propulsion of ships. In: Proceedings of the Conference of the Institution of Electrical Engineers, London, UK, 1997.1-6
- [13] Hasubek B E. Analysis and Design of Passive Rotor Transverse Flux Machines with Permanent Magnets on the Stator; [Ph. D dissertation]. Canada: the University of Calgary, 2000.42-57
- [14] 李永斌, 袁琼, 江建中. 一种新型聚磁式横向磁场永磁电机研究. 电工技术学报, 2003, 18(5): 46-49
- [15] 刘哲民. 横向磁通永磁同步电机研究: [博士学位论

- 文]. 沈阳:沈阳工业大学, 2006.17-35
- [16] Jeoung Y H, Kang D H, Kim J M. A design of a transverse flux motor with permanent magnet shield. In: Proceedings of the IEEE on Industrial Electronics, Pusan, Korea, 2001. 995-999
- [17] Popa D, Iancu V, Lorand S. Linear transverse flux reluctance machine with permanent magnets. In: Proceeding of the International Conference on Transversal Flux Machines, Changwon, Korea, 2006.85-90
- [18] 李永斌,高瑾,江建中. 横向磁场开关磁阻电机永磁屏蔽技术研究. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 164-168
- [19] Liu Cheng, Su K, Chen J W. Operational stability enhancement analysis of a transverse flux linear switched-reluctance motor. *IEEE Trans on Mag*, 2000, 36 (5): 3699-3702
- [20] Babazadeh A, Karimi H R, Moshiri B. A neuro-fuzzy based approach for output tracking of transverse flux machines. In: Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Control Applications, Toronto, Canada, 2005.272-276
- [21] 王建宽. 横向磁场永磁电机及其驱动系统研究:[博士学位论文]. 上海:上海大学, 2007.27-90
- [22] 贾邦强. 以 DSP 为基础的横向磁场式开关磁阻型线性电动机二维空间速度及悬浮力同步控制:[硕士学位论文]. 台湾: 国立中山大学, 2001.8-71
- [23] Jang G H, Park N K, Lee C I, et al. Reduction of the unbalanced magnetic force of a transverse flux machine by using symmetric multipair cores. *Journal of applied physics*, 103, 07F104, 2008: 1-3
- [24] Masmoudi A, Elantably A. The sizing of TFFM machines for bus and truck hybrid vehicle application. In: Proceedings of the 16h Electric Vehicle Symposium, Beijing, China, 1999, CD-ROM
- [25] Guo Y G, Zhu J G, Watterson P A, et al. Development of a PM transverse flux motor with soft magnetic composite core. *IEEE Trans on Energy Conversion*, 2006, 21(2): 426-434
- [26] Lee J Y, Hong J P, Chang J H, et al. Computation of inductance and static thrust of a permanent-magnet-type transverse flux linear motor. *IEEE Trans on Industry Application*, 2006, 42(2): 487-494
- [27] Kastinger G, Schumacher A. Reducing torque ripple of transverse flux machines by structure designs. In: Proceedings of the International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, University of Bath, UK, 2002.320-332
- [28] Lee J, Chang J, Kang D, et al. Tooth shape optimization for cogging torque reduction of transverse flux rotary motor using design of experiment and response surface methodology. *IEEE Trans on Mag*, 2007, 43(4): 1817-1820
- [29] Harris M R, Pajooman G H, Abu S M. The problem of power factor in VRPM (transverse-flux) machines. In: Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Drives, Cambridge, UK, 1997.386-390
- [30] Zhu Z Q, Howe D. Electrical machines and drives for electric, hybrid and fuel cell vehicles. *Proceedings of IEEE*, 2007, 95(4): 746-765

Overview of high torque density transverse flux machines

Wang Qian, Zou Jibin, Zhao Mei, Zhang Juan, Li Shuai

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract

In this paper, the operating principles of transverse flux machines (TFMs) are analyzed in detail and their torque magnification principles are investigated. The state-of-art of the machines' topological structures and features are overviewed and their control strategies are analyzed. Finally, the current problems of TEMs in structure design, performance analysis, etc. and the development trends of TFM are brought out. It is pointed out that TFM have a brilliant prospect in low speed, direct drive systems for their favorable features of high torque density, diverse topological structures, etc.

Key words: transverse flux, torque density, direct drive, decouple, pulsating magnetic field