

横向磁通电机研究综述

苏士斌, 史仪凯, 袁小庆, 韩 康, 崔田田, 马 艳

(西北工业大学机电学院, 陕西西安 710072)

摘 要: 横向磁通电机是一种具有较高转矩密度的特种电机, 已得到了深入研究和初步应用, 本文拟回顾关于横向磁通电机的研究发展. 在介绍拓扑结构基础上, 较系统地对现阶段国内外在横向磁通电机方面的研究进行阐述, 主要面包括拓扑结构研究、三维磁场分析、转矩脉动研究、漏磁研究、功率因数研究、SMC 研究、控制系统研究和应用研究等, 并探讨横向磁通电机重点研究方向和在大转矩、低转速驱动场合的发展趋势.

关键词: 横向磁通; 拓扑结构; 转矩脉动; 功率因数

中图分类号: TM351 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2013) 11-2290-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2013.11.028

Survey of Progress in Transverse Flux Motor

SU Shi-bin, SHI Yi-kai, YUAN Xiao-qing, HAN Kang, CUI Tian-tian, MA Yan

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract: Transverse flux motor has been initially applied to various fields with higher torque density. The purpose of this survey is to provide a review of transverse flux motor research. The topologies and their advantage of transverse flux motor are given, basis on a brief analysis of the mechanism of the transverse flux motor in this paper. The research of transverse flux motor is summarized. The main research is pointed out, including structure study, three-dimensional magnetic field analysis, cogging torque, leakage flux, power factor, SMC research, control systems and applied research. The development trend of the transverse flux motor in high torque and low speed is explored.

Key words: transverse flux; topology structure; cogging torque; power factor

1 引言

近年来, 随着电机的广泛应用, 涌现出许多新型特种电机, 这些电机已被广泛应用于航空、航天、航海、军事、工农业生产和日常生活等领域. 传统电机的磁路呈二维分布, 由于磁通经过的齿部和绕组所在的槽在同一截面上, 相互制约, 很难从根本上使其转矩密度得到提高. 德国 Weh. H. 教授^[1]提出并研制了横向磁通电机 (Transverse Flux Motor, TFM). 该电机同时提供径向和轴向的三维磁场, 其定子齿槽结构和电枢线圈在空间位置上互相垂直, 定子尺寸和通电线圈大小在一定范围内可以任意选取, 使电负荷和磁负荷相互解耦, 从根本上提高了电机的电磁转矩.

TFM 是一种高转矩密度的特种电机, 有着广阔的应用前景^[2~5], 它与常规径向电机相比, 具有以下几方面的显著优势:

(1) TFM 电机磁场呈空间三维分布, 实现了电路和

磁路解耦. 可以同时获得较大的定子齿横截面和线圈横截面, 增加电机的电负荷和磁负荷, 提高电机转矩密度.

(2) 设计自由度大. TFM 的拓扑结构多种多样, 设计灵活, 在保持其他参数不变时, TFM 的功率与极对数成正比. 多极的 TFM 特别适用于低速大转矩场合, 由于转速不高, 简化了减速齿轮传动, 提高了系统的使用寿命.

(3) 定子绕组形式简单, 绕组横截面比较规则, 线圈绕制很方便. TFM 绕组不存在传统电机的端部, 使绕组长度缩短, 利用率提高.

(4) 各相之间相互独立, 没有耦合, 分析和控制相对简单. 电机的容错性强, 可以在短时间内缺相运行, 保证系统的可靠运行^[6].

当然, 横向磁通电机也存在着结构复杂、漏磁较大、功率因数偏低等缺点.

本文在较系统地阐述横向磁通电机拓扑结构的基础上, 对现阶段横向磁通电机的研究现状和发展方向进行阐述.

2 TFM 拓扑结构

横向磁通电机发展至今,已出现了多种拓扑结构,依据拓扑结构的不同可分为平板式、聚磁式、无源转子式和磁阻式等四种结构形式。

2.1 平板式 TFM

平板式横向磁通电机中的永磁铁均匀平铺在转子表面^[7],相邻的永磁铁分别被充磁为相反的极性,电机定子铁芯以整极距均匀分布在圆周上,如图 1 所示.平板式横向磁通电机又分为单边型和多边型两种形式,单边平板式横向磁通电机多采用外转子结构,具有绕线方便、转矩较大、结构简单和机械鲁棒性等特点.双边平板式 TFM 较充分利用转子磁钢,其性能比单边平板式优越,但该电机结构较为复杂,机械强度较差。

2.2 聚磁式 TFM

聚磁式由于能够提高永磁体的利用率,因此成为研究中采用较多的一种结构^[8],拓扑结构也较为丰富,图 2 为双定子聚磁式横向磁通电机拓扑结构。

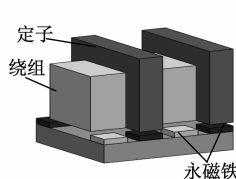


图1 典型平板式TFM结构

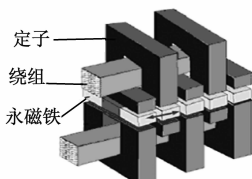


图2 TFM结构示意图

聚磁式横向磁通电机的主要特点是气隙磁通密度大,但结构较为复杂,机械强度较差,对加工条件要求较为苛刻。

2.3 无源转子式 TFM

平板式和聚磁式 TFM 的转子均由永磁磁钢和铁磁材料组成,转子本身具有磁势源,因而被称为有源转子,有源转子式电机主要问题是加工困难、机械结构差,转矩脉动大^[9]。

如果将转子永磁铁移到定子上,且将转子铁芯倾斜一个极距,则可构成所谓的无源转子,如图 3 所示.无源转子结构简单,便于加工,但增加了永磁铁的用量,因而此类电机的研究相对不多。

2.4 磁阻式 TFM

将聚磁式和无源转子式横向磁通电机中的永磁体

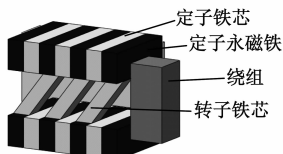


图3 无源转子式TFM结构

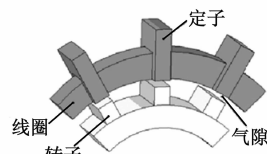


图4 磁阻式拓扑结构

去掉,仅在定子绕组中通入电流,通过磁阻作用同样可产生转矩,改进后的电机称为磁阻式横向磁通电机,如图 4 所示。

磁阻式 TFM 工作原理遵循磁通总是沿着最大磁导闭合路径的原则,当绕组通入电流时,将产生电磁转矩使转轴向磁导最大位置转动,最终停在定子和转子齿对齐位置^[10].磁阻式横向磁通电机的转矩与绕组电流方向无关,电机的正反转取决于通电相序.该电机特点是结构简单,便于装配,成本低,也易于做成直线电机,同时也存在转矩密度稍低等缺点。

上述的四种横向磁通电机中,平板式和磁阻式的结构比较简单,易于加工制造,但是它们的力矩性能弱于聚磁式结构.目前,以聚磁式横向磁通电机的研究最为普遍广泛,因为它出力性能最佳,一定电流可以提供较大的转矩密度和功率密度,而且出力能指标远大于其余三种横向磁通电机,随着制造工艺水平的提高,它最具有应用发展前途。

3 研究现状

目前,国内外关于横向磁通电机的研究主要集中在电机的结构研究、三维磁场分析研究、转矩脉动研究、漏磁研究、功率因数研究、SMC 研究、控制系统研究和应用研究等方面.深入研究横向磁通电机的结构、性能和控制策略等各关键难点,有助于降低横向磁通电机输出转矩波动和极间漏磁通,提高电机的功率因数,有助于进一步推动横向磁通电机的应用发展,具有较高的基础理论研究和实用价值。

3.1 TFM 结构研究

横向磁通电机转子是由永磁体和铁磁材料粘结而成,尺寸要求严格,永磁体间的相互作用力、材料的热胀冷缩、不规则硅钢片加工都增加了电机制作难度.复杂的结构和工艺是制约横向磁通电机发展的主要原因之一,优化磁路结构和制造工艺一直是横向磁通电机的研究热点.TFM 结构研究主要包括两个方面,一种思路是提出新型的结构^[11,12],另一种思路是对原有结构进行优化改善^[13~15]。

为了优化电机结构,王萑^[16]研制了结构简单、功率因数相对较高的四相外转子 TFM,其拓扑结构如图 5 所示,该结构将 U 型定子磁极变为齿形磁极,降低了材料与加工成本,提升了电机工作性能.文献[17]设计了一种新型组合定子式横向磁通电机,采用组合式定子和双边聚磁转子结构形式,具有结构简单、加工方便、磁场利用率高等特点。

3.2 三维磁场分析

电机的电磁场分析是进行电机深入研究的基础,TFM 的电磁场呈空间三维分布,磁路磁通较复杂,常采

用三维有限元法进行研究^[18-21]. 三维磁路的研究有助于深入洞悉 TFM 的电磁原理, 对于优化电机结构和提升电机的工作性能具有重要的指导意义.

Salwa Baserrah 等^[22]采用 FLUX3D 对 TFM 的三维磁路和磁阻进行深入研究, 寻找磁通磁路规律, 图 6 为研究得到的磁通图. 有限元分析法根据所采用磁位的不同, 可分为矢量磁位法和标量磁位法. 陈谢杰^[23]通过 ANSYS 软件对 TFM 内部电磁场求解区域进行简化处理, 并计算了电机的空载及负载电磁场. 褚文强^[24]对一种新型三相外转子横向磁通电机进行空载三维磁场分析, 研究了磁通变化曲线, 分析气隙长度、永磁体宽度对磁场影响.

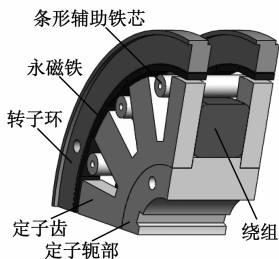


图5 新型TFM模型图

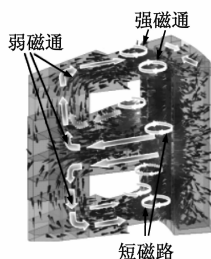


图6 FCPM-TFM磁路图

3.3 转矩脉动研究

产生 TFM 转矩脉动的因素角度, 主要因素有自定位力和控制策略. 抑制转矩脉动成为提高 TFM 驱动性能的一个重要研究点, 主要采取两种措施, 一种是进行电机本体结构的优化设计^[25], 另一种是从电机控制方案入手, 通过调整定子绕组的电压或电流波形来减少转矩脉动^[26,27].

自定位转矩是由转子上的永磁体和定子齿之间相互作用产生的转矩, 是产生转矩脉动的主要原因. 自定位转矩引起的转矩脉动问题严重影响了 TFM 在直接驱动系统中的广泛应用. 自定位转矩的大小主要由永磁体和定子齿尺寸决定, 其频率是基波的两倍, 采用多相结构能够使自定位转矩得到极大地抵消, 抑制电机转矩波动, 提高电机的稳定性. 施进浩^[28]提出新型组合定子铁心聚磁式 TFM, 采用二维场简化模型定性分析 TFM 自定位转矩和不同定子极宽尺寸对自定位转矩产生的影响. 包广清^[29]采用三维等效磁网络法对多相聚磁式组合定子横磁通电机进行磁场分析和性能计算, 证明在轴向和径向进行多相合成时, 可以在提高电机输出功率, 使部分自定位力矩相互抵消, 有效抑制转矩脉动.

3.4 漏磁研究

横向磁通电机漏磁影响的因素很多, 可以分为拓扑结构性漏磁和控制方案性漏磁, 对漏磁研究较多的是拓扑结构性漏磁研究. TFM 磁场分布比传统电机磁

场复杂, 主要包含主磁通、极间磁通和端部磁通三部分. 由于横向磁通电机的定子多为一系列孤立的 U 型铁芯构成, 铁芯与空气接触面积比较大, 极间漏磁较严重, 端部漏磁在负载较大时也表现的稍明显.

严重的漏磁使永磁体的利用率下降, 这是影响横向磁通电机功率因数低下的主要原因. 一些研究者在拓扑结构和屏蔽优化方面对漏磁进行了大量的研究, 通过电磁场有限元分析软件对 TFM 拓扑结构模型进行研究, 改善结构以达到减少漏磁、增强气隙磁密的目的^[30-32]. 另外, 电机的齿宽也在一定程度上影响着电机漏磁, 如果齿宽过大, 邻近磁极对主磁极的影响将更加严重, 如果齿宽过小, 又会使主磁极产生较大漏磁, 因此合理选择齿宽也是减小电机漏磁, 提高永磁体利用率的一个关键因素. 为了减小漏磁, 文献^[33]提出了一种屏蔽 TFSRM 漏磁通的方法, 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屏蔽漏磁通, 能极大提高气隙磁通密度和电机的输出功率. 韩国电工技术研究中心和韩国 Silla 大学^[34]利用永磁体实现磁场屏蔽, 从而改善电机磁场分布, 提高电机性能, 3D 有限元计算结果显示加入屏蔽永磁体后能使电机推力增加近 160%, 如图 7 所示.

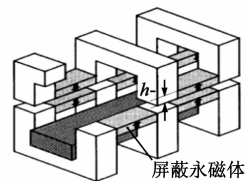


图7 永磁体屏蔽结构

通过减少漏磁不仅可以提高永磁体的利用率, 减少永磁体的使用量, 使原来的漏磁通转换为经过气隙的有效磁通, 增加气隙磁密, 而且可以提高功率因数, 提升电机工作性能.

3.5 功率因数研究

目前, 国内外制造出的 TFM 功率因数一般较低. 功率因数偏低, 使电机的驱动电流增加, 导致控制器容量、电机损耗等相应增加, 也会导致电枢绕组内部形成较高的感应电动势, 增加电机的耐压绝缘水平和变频器的电压容量, 影响电机的性能. 因此, 提高 TFM 功率因数对广泛应用 TFM 具有重要的实际价值, 其已成为关键研究热点^[35].

提高 TFM 功率因数的研究将是 TFM 应用研究的重点. 不论其工作性能和应用领域要求, 低下的功率因数都将限制其广泛的应用, 因此希望通过结构设计及优化、控制策略改进等方案来改善 TFM 功率因数. 提高功率因数的主要方法有^[36-38]:

(1) 在结构形式、气隙圆直径和轴向长度尺寸确定

的情况下,电机的永磁气隙磁密基波幅值越高,电机的转矩密度与功率因数越高。

(2)合理设计磁路,适当增加电机的等效气隙长度,同时增加永磁体的磁化方向长度,可以提高电机功率因数。

(3)选用较低的电流线负荷有助于提高电机功率因数,但电机转矩密度将因此下降。

(4)其他参数不变的情况下,电机轴向长度越短,功率因数越高,但转矩密度会减小。

(5)采取有效措施减少电枢反应漏磁通,亦可提高电机的功率因数。使漏磁通在总的电枢反应磁通中所占比例下降,电机的功率因数提高。

(6)电机功率因数不仅取决于电机本体参数,而且还与驱动器控制方式有关。为了提高电机负载时的功率因数,可以采用“正交电流补偿”的弱磁控制策略,但电机电流线负荷及铜损耗有一定程度增加。

3.6 SMC 研究

硅钢片叠片铁心结构简单,磁性能各向异性,应用于三维磁路时受到很大限制。软磁复合(Soft Magnetic Composite, SMC)材料采用粉末冶金技术制造,由表面绝缘的金属粉末颗粒组成,能一次成型压制成形状复杂的铁心部件,并具有良好的各向同性磁性能,在 TFM 中具有良好的使用前景。

近年来 SMC 发展较快,SMC 以其显著的优点使其能够应用到横向磁通电机中成为可能,具有加工工艺简单、铁心结构灵活等特点,国内外许多科研机构利用 SMC 开发了 TFM^[39-41]。但其也存在着不足,磁性能比硅钢片差,材料较脆,在两极电机定子齿尺寸较小时,容易发生根部断裂。硅钢片叠片铁心与 SMC 铁心各有优点,组合这两种材料研制 TFM 混合铁心是一个比较好的思路^[42]。

3.7 控制系统研究

横向磁通电机本质上属于同步电机的范畴,矢量控制、直接转矩控制、模糊控制、BP 神经网络控制、滑模控制等同步电机的控制方法,可以应用到横向磁通电机的控制中^[43-45]。横向磁通电机各相间解耦,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,以此来提升电机的工作性能。

杨宁等^[46]将 BP 神经网络和 PI 控制进行组合,构成鲁棒性较高的控制系统,取得了良好的控制效果,实现横向磁通电机跟踪性能和抗负载扰动性能的提高。

3.8 应用研究

横向磁通电机是一种具有较高转矩密度的特种电机,易于实现多相、多极结构,可缺相运行,能够较好地

提高电机的容错能力,同时又具有大转矩、低转速的特性,使其特别适合用于风力发电机、公交车用轮毂电动机、电动汽车、直驱型舰船电力推进、磁悬浮驱动、机器人等驱动领域^[47]。目前,国内外对于横向磁通电机在风力发电领域的应用开展了相关理论和技术的研究,提出了一些新型的电机结构。荷兰 DelftTU 大学参与了欧洲 UpWind 风电整合项目,正在研制 10MW 的横向磁通永磁风力发电机^[48]。国内一些大学对横向磁通电机在低速风力发电领域应用进行了大量的研究,并取得了成果。东南大学颜建虎^[49]提出了一种磁通切换型横向磁通永磁发电机,其永磁体置于定子中,转子结构简单,产生的气隙磁通密度高。

TFM 的低转速、大转矩特性使其在低速驱动领域具有显著的优势,如电动汽车、轮椅、老年代步车、巡检机器人等应用领域^[50,51]。随着对横向磁通电机研究的逐步深入,横向磁通电机控制运行性能逐步得到提高,低转速、大转矩驱动领域将是横向磁通电机未来主要的应用领域。

4 结论

本文回顾了横向磁通电机当前的发展状况,其具有转速低、转矩密度高、电磁解耦、控制方便等特性,特别适合于低速驱动、大转矩领域。横向磁通电机以其独特多样的结构形式和优良的低速特性正得到越来越多的关注,其应用领域也日益扩展,从大功率的船用电力推进到小功率的电动车驱动等。

横向磁通电机发展至今,为了提升电机工作性能,尽管在拓扑结构、三维磁场、自定位转矩和工业应用等多个方面进行了大量的研究,且已取得了显著成果,但距成熟应用还有相当多的难点需要进行深入研究,主要集中在基于三维电磁场分析的结构研究,提升功率因数研究和转矩控制研究等方面,这些将是今后一段时间内横向磁通电机研究应重点解决的关键问题。相信,随着研究的进一步深入,横向磁通电机将会在电力推动、低速直接驱动、伺服传动和大功率风力发电等领域取得突破性的进展。

参考文献

- [1] Weh H, May H. Achievable force densities for permanent magnet excited machine in new configuration[A]. Proceedings of ICEM[C]. Munchen, Germany, 1986. 1107 - 1111.
- [2] 汤睿,刘宏立,戴瑜兴.自适应逆控制策略在 IC 材料切片设备中的应用[J].电子学报,2009,37(11):2480 - 2483.
Tang Rui, Liu Hongli, Dai Yuxing. Adaptive inverse control strategy and its application in IC material slicing equipment[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(11): 2480 - 2483. (in Chi-

- nese)
- [3] Zhang Shaobai, Ruan Xiaogang, Cheng Xiefeng. A new cerebellar control scheme and simulation based on kalman estimator [J]. Chinese Journal of Electronics, 2009, 18(2): 297 – 301.
 - [4] 曹政才, 赵应涛. 车式移动机器人轨迹跟踪控制方法[J]. 电子学报, 2012, 40(4): 632 – 635.
Cao Zhengcai, Zhao Yingtao. Trajectory tracking control approach of a car-like mobile robot[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(4): 632 – 635. (in Chinese)
 - [5] Arshad Waqas M, Thelin Peter, Bäckström Thomas. Use of transverse-flux machines in a free-piston generator [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40 (4): 1092 – 1100.
 - [6] 王骞, 邹继斌, 赵玫, 张娟. 高转矩密度横向磁场电机及其发展[J]. 高技术通讯, 2010, 20(7): 758 – 764.
Wang Qian, Zou Jibin, Zhao Mei, Zhang Juan. Overview of high torque density transverse flux machines[J]. Chinese High Technology Letters, 2010, 20(7): 758 – 764. (in Chinese)
 - [7] Erich Schmidt. Finite element analysis of a novel design of a three phase transverse flux machine with an external rotor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(5): 982 – 985.
 - [8] Cosic Alija, Sadarangani Chandur. 3D analyses of a novel transverse flux machine for a free piston energy converter [A]. International Conference on Electrical Machines [C]. Vilamoura, 2008. 1 – 6.
 - [9] Hasubek B E, Nowicki E P. Design limitations of reduced magnet material passive rotor transverse flux motors investigated using 3D finite element analysis [A]. Conference on Electrical and Computer Engineering [C]. Halifax, NS, 2000, 1(1): 365 – 369.
 - [10] Cheng-Tsung Liu, Kun-Shian Su. Operational stability enhancement analysis of a transverse flux linear switched reluctance motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36 (5): 3699 – 3702.
 - [11] Leskovec J, Pevec B. Optimization of the transverse flux motor based on design of experiments [A]. International Conference on Power Electronics and Drive Systems [C]. Taipei, 2009. 932 – 937.
 - [12] Alija Cosic, Chandur Sadarangani. Design and manufacturing of a linear transverse flux permanent magnet machines [A]. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting [C]. Piscataway USA, 2008. 1 – 5.
 - [13] Emil Padurariu, Liviu, Emilian Somesan. Large power permanent magnet transverse flux motor steady-state and dynamic behavior [A]. 2012 ELEKTRO [C]. Rajec Teplice, 2012. 221 – 224.
 - [14] M. Bellucci, V Isastia Cimino. A transverse flux permanent magnet machine for micro-wind generation application [A]. International Conference on Clean Electrical Power [C]. Ischia, 2011. 802 – 806.
 - [15] Zhao Mei, Zou Ji-bin, Jiang Xin-tong. Influence of axial length ratio of stator segment on performance of tubular transverse flux linear machine [A]. 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation [C]. Chicago, IL, 2010. 1.
 - [16] Wang Huan, Shi Yikai, Tang Bo. An investigation of four-phase flat-type TFPM and control system [A]. Fourth International Conference on Innovative Computing, Information and Control [C]. Kaohsiung, 2009. 476 – 479.
 - [17] Bao G Q, Wang J K, Zhang D, Jiang, J Z. An investigation of multi-phase transverse flux permanent magnet machine [A]. IEEE 5th International Conference on Power Electronics and Motion Control [C]. Shanghai, 2006, (2). 1 – 4
 - [18] Seyedmohsen Hosseini. Design prototyping and analysis of a novel modular permanent-magnet transverse flux disk generator [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(4): 772 – 780.
 - [19] T F Chan, Weimin Wang. Magnetic field in a transverse axial flux permanent magnet synchronous generator from 3D FEA [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(2): 1055 – 1058.
 - [20] Deliege G, Vande Sande, H. Hameyer. 3D finite element computation of a linear transverse flux actuator [A]. International Conference on Power Electronics, Machines and Drives [C]. Bath UK, 2002. 315 – 319.
 - [21] Schmidt E., Brunnschweiler, D.. Finite element analysis of a transverse flux machine with an external rotor for wheel hub drives [A]. XIX International Conference on Electrical Machines [C]. Rome, 2010. 1 – 6.
 - [22] Salwa Baserrah, Bernd Orlik. Experimental verification of a compact permanent magnet transverse flux machine in a sector configuration [A]. 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference [C]. Niagara Falls, 2011. 1159 – 1164.
 - [23] 陈谢杰, 王秀和, 刘哲民. 横向磁通永磁电机的三维电磁场分析 [J]. 沈阳工业大学报, 2007, 29(1): 53 – 56.
Chen Xiejie, Wang Xiuhe, Liu Zheming. Analysis of 3D electromagnetic field in transverse flux permanent magnet motor [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2007, 29 (1): 53 – 56. (in Chinese)
 - [24] 褚文强, 辜承林. 新型横向磁通永磁电机磁场研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(24): 58 – 62.
Chu Wenqiang, Gu Chenglin. Study on magnet field of novel transverse flux permanent magnet machine [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(24): 58 – 62. (in Chinese)
 - [25] Do Hyun Kang. Increasing of thrust force in transverse flux machine by permanent-magnet screen [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(5): 1952 – 1955.
 - [26] Dreher F, Parspour N. Reducing the cogging torque of PM

- transverse flux machines by discrete skewing of a segmented stator[A]. International Conference on Electrical Machines [C]. Marseille, 2012. 454 – 457.
- [27] Ferreira daLuz M V, Dular P, Sadowski N. Development of analytical equations to calculate the cogging torque in transverse flux machines[A]. IEEE International Conference on Electric Machines and Drives[C]. Miami, FL, 2009. 1612 – 1616.
- [28] 施进浩,李永斌,江建中.聚磁式横向磁场永磁电机自定位转矩研究[J].电工技术学报,2005,20(3):36 – 39.
Shi Jinhao, Li Yongbin, Jiang Jianzhong. Research on the cogging torque of a novel transverse flux permanent magnetic machine with the concentrated flux rotor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(3): 36 – 39. (in Chinese)
- [29] 包广清,江建中,施进浩.多相聚磁式横磁通永磁电机的自定位力矩研究[J].中国电机工程学报,2006,26(15):139 – 143.
Bao Guangqing, Jiang Jianzhong. Study on the cogging torque of polyphase transverse flux permanent magnet machine with concentrated flux rotor[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(15): 139 – 143. (in Chinese)
- [30] Dobzhanskiy O, Mendrela E E. Analysis of leakage flux losses in the transverse flux permanent magnet generator[A]. Green Technologies Conference 2011 IEEE[C]. Baton Rouge, LA, 2011. 1 – 6.
- [31] Jeong Y H, Kang D H, Kim J M, Jang S M. A design of transverse flux motor with permanent magnet shield[A]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics[C]. Pusan, 2001. 2:995 – 999.
- [32] Arshad W M, Thelin P, Backstrom T, Sadarangani, C. Use of transverse-flux machines in a free-piston generator[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 44(4): 1092 – 1100.
- [33] Qian Wang, Jibin Zou. Enhancement of thrust force of a tubular electromagnetic launcher with transverse flux configuration by leakage flux suppression[A]. 16th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology[C]. Beijing, 2012. 1 – 6.
- [34] J Y Lee, J P Hong, D H Kang. Analysis of permanent magnet type transverse flux linear motor by coupling 2D finite element method on 3D equivalent magnetic circuit network method[A]. 39th Industry Applications Conference [C]. Seattle, USA, 2004. 3:2092 – 2098.
- [35] Zhao Yu, Chai Jianyun. Power factor analysis of transverse flux permanent machines[A]. The Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems[C]. Nanjing, 2005. 1:450 – 453.
- [36] Lu K Y, Ritchie E, Rasmussem P O, Sandholdt P. Modeling and power factor analysis of a single phase surface mounted permanent magnet transverse flux machine[A]. Fifth International Conference on Power Electronics and Drive Systems [C]. Taiwan, 2003, 2(2): 1609 – 1613.
- [37] Wang Huan; Shi Yi-kai; Tang Bo; Yuan Xiao-qing. An investigation of four-phase flat-type TFPM and control system[A]. Fourth International Conference on Innovative Computing, Information and Control[C]. Kaohsiung, 2009. 476 – 479.
- [38] Castagna N, Guena J. Low velocity high flux continuous source of cesium atoms[A]. 20th European Frequency and Time Forum[C]. Braunschweig, 2006. 206 – 212.
- [39] Pennander Lars-Olova, Jack Alanb. Development of iron powder SMC materials and its application in electrical machines [J]. Metallic Functional Materials, 2002. 69(3): 19 – 25.
- [40] Junghwan Chang, Jiyoung Lee, Jiwon Kim, Siuk Chung, Weh H. Development of rotating type transverse flux machine[A]. IEEE International Conference on Electric Machines & Drives [C]. Antalya Turkey, 2007. 2: 1090 – 1095.
- [41] Youguang Guo, Jianguo Zhu, Haiyan Lu. Performance analysis of an SMC transverse flux motor with modified double-sided stator and PM flux concentrating rotor[A]. International Conference on Electrical Machines and Systems[C]. Seoul, 2007. 1553 – 1556.
- [42] 卢琴芬,谢舸.混合铁心横向磁通永磁电机的设计与分析[J].中国电机工程学报,2011,31(9):66 – 70.
Lu Qinfen, Xie Ge. Design and analysis of a transverse flux permanent magnet motor with hybrid iron-core[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(9): 66 – 70. (in Chinese)
- [43] Xiaotao Tu, Chenglin Gu. Direct torque control of novel transverse flux permanent magnet motor based on phase advance commutation[A]. International Conference on Electrical Machines and Systems[C]. Beijing, 2011. 1 – 4.
- [44] Seon-Hwan Hwang, Hui Li, Je-Wook Park. Vector control of multiple-module transverse flux PM generator for large-scale direct-drive wind turbines [A]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition [C]. Phoenix AZ, 2011. 2365 – 2372.
- [45] Babazadeh A, Karimi H R, Moshiri B. A neuro-fuzzy based approach for output tracking of transverse flux machines[A]. IEEE Conference on Control Applications[C]. Toronto Ont, 2005. 272 – 276.
- [46] 杨宁,史仪凯,袁小庆,黄磊.基于BP网络横向磁场永磁电机调速系统的设计[J].西北工业大学学报,2011,29(5):824 – 828.
Yang Ning, Shi Yikai, Yuan Xiaoqing, Huang Lei. A novel and better design of TFPM PI speed control system using BP neural network[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(5): 824 – 828. (in Chinese)
- [47] Mehdi Taghizadeh Kakhki, Maxime R. Dubois. High efficien-

cy rectifier for a variable speed transverse flux permanent magnet generator for wind turbine applications[A]. 14th European Conference on Power Electronics and Applications[C]. Birmingham, 2011. 1 - 10.

- [48] Deok-Je Bang, Polinder H, Shrestha G, Ferreira J A. Ring-shaped transverse flux PM generator for large direct-drive wind turbines[A]. International Conference on Power Electronics and Drive Systems[C]. Taipei, 2009. 61 - 66.
- [49] 颜建虎, 林鹤云, 冯奕. 磁通切换型横向磁通永磁风力发电机[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(21): 67 - 72.
Yan Jianhu, Lin Heyun, Feng Yi. Flux switching transverse flux permanent magnet wind generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(21): 67 - 72. (in Chinese)
- [50] Gartner M, Seibold P, Parspour N. Laminated circumferential transverse flux machines lamination concept and applicability to electrical vehicles[A]. IEEE International Conference on Electric Machines & Drives[C]. Niagara Falls, 2011. 831 - 837.
- [51] Anyuan Chen, Nilssen R, Nysveen A. Performance comparisons among radial-flux multistage axial-flux and three-phase

transverse-flux PM machines for downhole applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(2): 779 - 789.

作者简介



苏士斌 (通信作者) 男, 1979年1月出生
于河南, 西北工业大学机电学院博士研究生. 主
要研究方向为横向磁通电机控制.

E-mail: gongjuqianzi@163.com



史仪凯 男, 1962年2月出生于西安, 西北
工业大学机电学院博士生导师. 主要研究方向为
横向磁通永磁电机设计和应用.

E-mail: ykshi@nwpu.edu.cn