

上海大学出版社

2006年上海大学博士学位论文 63



新型横向磁场永磁 电机设计与研究

- 作者：施进浩
- 专业：电力电子与电力传动
- 导师：江建中



2006年上海大学博士学位论文 63



新型横向磁场永磁 电机设计与研究

- 作者：施进浩
- 专业：电力电子与电力传动
- 导师：江建中

TM351-533
SJH

Shanghai University Doctoral Dissertation (2006)

Design and Research on a Novel Transverse Flux Machine

Candidate: Shi Jinhao

Major: Power Electronics and
Electrical Transmission

Supervisor: Jiang Jianzhong

Shanghai University Press

• Shanghai •

图书在版编目(CIP)数据

2006 年上海大学博士学位论文. 第 2 辑/博士学位论文编辑部编. —上海:上海大学出版社,2010.6

ISBN 978-7-81118-513-3

I. 2... II. 博... III. 博士—学位论文—汇编—上海市—2006 IV. G643.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 162510 号

2006 年上海大学博士学位论文

——第 2 辑

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路 99 号 邮政编码 200444)

(<http://www.shangdapress.com> 发行热线 66135110)

出版人:姚铁军

*

南京展望文化发展有限公司排版

上海华业装潢印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本 890×1240 1/32 印张 278 字数 7 760 千

2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

印数:1—400

ISBN 978-7-81118-513-3/G·514 定价:880.00 元(44 册)

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查,确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单:

主任:陶生桂 教授,同济大学

委员:陶生桂 教授,同济大学

黄进 教授,浙江大学

陈国先 教授,上海大学

袁海林 教授级高工,二十一所

章跃进 副教授,上海大学

导师:江建中 教授

答辩日期:2006年6月18日

学大稿上

合群人部 查审员委利全会员委鞭答至文分本
。求要量则文分立学士制学大稿上

评阅人名单:

陶生桂 教授, 同济大学

黄 进 教授, 浙江大学

王宗培 教授, 哈工大

单各会员委鞭答

孙金南: 丑主

孙金南: 员委

孙金南

孙金南

孙金南

孙金南

孙金南: 丑主

日81月6年2008: 期日稿上

答辩委员会对论文的评语

横向磁场永磁电机(TFPM)是当今电机领域的研究前沿之一,具有转矩密度高、低速性能好和设计灵活等优点,论文选题具有重要学术意义和实用价值。

作者阅读了大量相关文献,作出了正确的评述,并获得了下列创造性成果:

(1)提出了一种以具有定位安装功能和公共联结铁芯为特征的新型定子结构,大大简化了制造工艺,显著提高了定子部件的装配定位精度和零部件的标准化程度,降低了生产成本。

(2)针对横向磁场永磁电机磁场结构的复杂性,采用三维磁网络法对电机的主要参数进行了分析和计算,完成了实验样机的设计研究。

(3)建立了横向磁场永磁电机的数字模型,开发了通用模块化数字仿真系统,完成了实验样机及其控制系统的动态仿真,优化了控制策略。

(4)建立了样机的实验平台,完成了实验研究,实验结果与设计计算相符合。

论文概念清楚,层次分明,论述严谨,文笔流畅,内容涉及电机、电力电子、控制和计算机等多学科的理论和技术。

以上表明,作者具有扎实宽广的基础理论和系统深入的专门知识,具有强的独立从事科研工作能力。答辩过程中,表述清楚,回答问题正确。

经答辩委员会表决,一致同意通过施进浩同学的博士论文答辩,并建议授予工学博士学位。

答辩委员会表决结果

一致同意通过论文答辩,建议授予博士学位。

答辩委员会主任签名: **陶生桂**

2006年6月18日

摘 要

作为一种逆变器供电的新型电动机结构形式,横向磁场永磁电动机(TFPM)具有运行转速低、输出力矩大、可靠性高和过载能力强等显著优点,在电气直接驱动领域得到了日益广泛的重视;然而其结构复杂、制造难度大、生产成本低和设计分析手段匮乏等一直是制约其发展的关键问题。本文提出了一种新型拓扑结构的横向磁场永磁电动机,并借此对横向磁场永磁电动机进行了深入系统的研究分析,取得了下列卓有成效的成果:

第一,在充分分析和掌握国内外横向磁场永磁电动机的发展现状和现有各种类型拓扑结构的基础上,提出了一种不同于现有定子结构形式的新型横向磁场永磁电动机的拓扑结构形式。这种新型横向磁场永磁电动机的定子采用了具有装配定位功能的槽形口的公共联结铁芯,从而内外定子磁极铁芯可以积木式地直接插入公共联结铁芯的槽形口中,大大简化了制造工艺,降低了生产成本,显著提高了定子部件的装配定位精度和电动机生产的标准化程度,具有较高的创新性和实用性。

第二,针对横向磁场永磁电动机磁场结构的复杂性,以及由电枢电流产生的定子磁场和由永磁体产生的转子磁场各自处在相互垂直平面内的特点,深入研究了三维磁网络法的基础理论,以及三维磁网络法在永磁体和载流线圈的内部磁场计算中的具体应用,进而利用三维磁网络法计算了横向磁场永磁电动机的主要参数和工作特性。因此,本课题的研究有力地促进了科学研究与工程实用计算之间的有机紧密的结合。

第三,根据两相横向磁场永磁电动机结构特点和运行特性,设计制作了相应的驱动系统,详尽地分析了两相横向磁场永磁电动机在单极性导通模式下运行的工作特性。

第四,建立了横向磁场永磁电动机的数学模型,在 MatLab/SimuLink 软件平台上开发了横向磁场永磁电动机的通用模块化数字仿真模型。在此基础上,完成了本课题试验样机及其控制系统的动态仿真,优化了控制策略,分析了不同模式下运行的横向磁场永磁电动机的工作特性。同时,本课题把自主开发的通用模块化数字仿真模型与 3DFEM 结合起来,创建了比较完善的横向磁场永磁电动机软件开发平台,为进一步研究横向磁场永磁电动机及其控制系统创造了良好的科研手段。

最后,对试制样机进行了实验研究。测试结果与设计计算相符合,验证了设计计算的正确性。

关键词 横向磁场永磁电机,公共联结铁芯,拓扑结构,三维等效磁网络,数字仿真,控制系统

Abstract

As a novel invert-fed electric machine, the transverse flux permanent-magnet electric machine (TFPM) presents many advantages, such as lower speed, higher torque-density, higher reliability and higher over-load ability, and therefore the transverse flux permanent-magnet electric machine (TFPM) becomes more and more important in the electric direct driving area. However, the complicated structure, the difficulty in manufacturing, higher cost of production, and shortage of designing and analysing methods for TFPM limit its development. In this thesis, a novel topology structure of TFPM was proposed. Based on this prototype, an in-deep research work was proceed, and have a good success as below.

Firstly, on the basis of in-depth analysing and understading the existing various topology structures and the development stutus of the transverse flux permanent-magnet electric machine at home and abroad, proposed a novel topology structure of TFPM which is different from those of the traditional TFPMs. Using a common-linkage stator core on which there is a lot of slots for positioning and mounting in this novel topology structure, the outside and inside core of stator-poles can be inserted into slots easily just like the

building blocks, therefore, this new structure can simplify the manufacturing process, reduce the cost of production, enhance the accuracies for positioning and mounting, standardize the stator parts, etc. This novel topology structure is an innovation, and has a better practicability.

Secondly, according to the complicated structure of magnetic circuit of the TFPM, and the feature that the stator-magnetic field created by armature current and the rotor-magnetic field created by permanent-magnet are not located in a series of parallel-planes which have the same direction, make a thorough study of the fundamental theory of three-dimensional equivalent magnetic network method (3DEMN) and its application in the inside areas of permanent-magnet and armature coil. Using this method calculate the main parameters and performance of the prototype. This project improve the connection between the scientific research and engineering calculation practice.

Thirdly, according to the structure feature and operational performance of the two-phase TFPM, a control system was designed and prepared. The performance under unipolar conducting mode was analysed in detail.

Fourthly, A non-linear mathematic model for TFPM was established, and an universal modularized digital simulation model was developed on the platform of MatLab/SimuLink software package. Based on this platform, dynamic digital simulation for the prototype and its control system was executed, control strategy was to be optimized, the

operational performance under different modes was to be analysed. Meanwhile, a full software platform for the developing of TFPMs was established together with 3DEMNI, therefore, a good scientific research measure for further researching and analysing TFPMs and their control systems was created.

Finally, the experiments for the prototype have been executed. The test results have a good coincidence with those of designing, the correctness of designing and analysing was to be identified.

Key words Transverse flux permanent magnet electric machine (TFPM); common-linkage stator core; topology structure; three-dimensional equivalent magnetic network method (3DEMNI); digital simulation; control system

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 横向磁场永磁电机工作原理和特点	1
1.2.1 传统电机的转矩密度	2
1.2.2 横向磁场永磁电机的转矩提升原理	3
1.2.3 横向磁场永磁电机的特点	5
1.3 横向磁场永磁电机的分类	5
1.3.1 平板式横向磁场永磁电机	6
1.3.2 聚磁式横向磁场永磁电机	7
1.3.3 无源转子横向磁场永磁电机	8
1.4 横向磁场永磁电机的发展现状及存在的问题	8
1.4.1 横向磁场永磁电机的发展现状	8
1.4.2 横向磁场永磁电机存在的问题	10
1.5 本论文主要研究内容	11
第二章 新型具有公共联结铁芯的积木式横向磁场永磁电机结构设计	13
2.1 定子结构及设计	13
2.2 转子结构及设计	16
2.3 位置传感器结构及设计	17
2.4 样机实物照片	19
第三章 横向磁场永磁电机的三维场分析与特性计算	20
3.1 概述	20

3.2	三维等效磁网络法的基本原理	21
3.2.1	磁网络法的基本方程	21
3.2.2	网络单元边磁导的计算	22
3.2.3	永磁体的磁导、磁动势计算	24
3.2.4	电流源的等效磁动势	26
3.2.5	网络方程的建立	27
3.2.6	网络单元内任意点的磁位计算	29
3.3	样机的三维磁场分析	31
3.3.1	网络单元的剖分	31
3.3.2	气隙磁密分布	33
3.4	电机特性计算	36
3.4.1	空载电势计算	36
3.4.2	电磁转矩计算	38
3.5	电机参数计算	39
3.5.1	每相电阻计算	39
3.5.2	每相电感计算	40
3.6	电机有效材料计算	42
3.6.1	铜质量计算	42
3.6.2	定子有效材料质量计算	42
3.6.3	转子有效材料质量计算	43
3.6.4	电机有效材料质量计算	43
3.7	损耗和效率计算	43
3.7.1	铜耗计算	43
3.7.2	铁耗计算	43
3.7.3	风磨耗和附加损耗计算	44
3.7.4	总损耗和效率计算	44
第四章	横向磁场永磁电机控制系统设计	45
4.1	H 型功率变换器工作模式及驱动电路	46

4.2	转子位置信号的检测和换流控制逻辑	49
4.3	电流检测及整流电路	50
4.4	电流滞环控制器	51
第五章	横向磁场永磁电机的数学模型及系统仿真	53
5.1	TFPM 的数学模型	53
5.2	横向磁场永磁电机及控制系统仿真模型	55
5.2.1	TFPM 仿真模型	55
5.2.2	位置检测模块	57
5.2.3	滞环调节器模块	57
5.2.4	PWM 发生器模块	58
5.3	仿真结果	58
第六章	新型横向磁场永磁电机样机及其试验研究	64
6.1	横向磁场永磁电机样机	64
6.2	试验平台和转子位置传感器安装	65
6.2.1	试验平台	65
6.2.2	转子位置传感器安装和位置信号调整	66
6.3	样机的稳态运行特性实验	68
6.3.1	给定电流控制的电流波形	69
6.3.2	给定电流控制的特性曲线	72
第七章	结论	75
参考文献		77
作者在攻读博士学位期间完成的主要工作		91
致谢		93

第一章 绪 论

1.1 引言

随着电动车、磁悬浮铁路和舰船电力驱动等大功率电气传动技术以及大功率风力发电技术的发展,人们开始对低速、高转矩密度、直接驱动电动机的要求日益迫切。其中稀土永磁电机以其效率高、体积小以及转矩密度大等特点成为直驱电机的主流^[1-4]。

目前直接驱动永磁电动机以其励磁磁场方向进行分类主要有两种结构形式:径向励磁和轴向励磁,并且由于径向励磁的永磁电动机结构简单,与传统电机的加工工艺相类似,成为直驱永磁电动机的主流,例如在目前电动自行车中就广泛采用了这种径向励磁的、外转子直驱永磁电动机。然而对于有更大转矩输出和更小体积要求的场合,这种传统径向励磁结构的直驱电动机很难满足转矩提升的要求。这主要是由于磁通流经的齿部和电流流过的电枢绕组在同一截面上,这就存在着增加气隙磁通与提高绕组电流密度之间的矛盾,即磁通量与电流密度的乘积基本保持在一定范围内,因此输出转矩密度难以得到更高的提升^[5,6]。为了进一步减小大功率直驱电动机的体积、重量和原材料的消耗,提高材料利用率,研究新型结构形式的高转矩密度直驱电机具有重要的学术价值和实用意义。

1.2 横向磁场永磁电机工作原理和特点

横向磁场永磁电机从理论上较好地解决了上述转矩密度提升问题。横向磁场永磁电机(Transverse Flux PM Machine, TFPM)最早是