

各相解耦永磁同步电机设计 及控制技术的研究

作者: 崔 巍

专 业: 控制理论及控制工程

导 师: 江建中



上海大学出版社

· 上 海 ·

2004 年上海大学博士学位论文

各相解耦永磁同步电机设计 及控制技术的研究

作 者： 崔 巍

专 业： 控制理论及控制工程

导 师： 江建中



上海大学出版社

• 上海 •

Shanghai University Doctoral Dissertation (2004)

The Study on the Design and Control Techniques of Phase-Decoupling Permanent Magnetic Synchronous Motor

Candidate: Cui Wei

Major: Control Theory and Control Engineering

Supervisor: Prof. Jiang Jianzhong

Shanghai University Press

• Shanghai •

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：贺益康	教授，浙江大学电气工程系	310027
委员：陶生桂	教授，上海同济大学电气工程系	200072
金如麟	教授，上海交通大学电气工程系	200030
袁海林	教授，电子工业集团第 21 研究所	200233
傅丰礼	研究员，上海电器科学研究所	200065
导师：江建中	教授，上海大学	200072

评阅人名单:

贺益康	教授, 浙江大学电气工程系	200030
陶生桂	教授, 上海同济大学电气工程系	200072
屠关镇	教授, 上海大学自动化系	200062

评议人名单:

张逸成	教授, 电子科技大学	610054
肖如鸿	教授, 山东大学电气工程系	250061
秦 和	教授, 上海电器科学研究所	200065
陈国程	教授, 上海大学	200072

答辩委员会对论文的评语

本论文提出了一种具有各相解耦特点的自控式永磁同步电机,从特殊齿槽配合、绕组设计、转子偏心气隙和磁路结构优化上保证了各相间的最低耦合程度以及反电势正弦化,并获得了相应的设计规律;提出了一种各相解耦永磁同步电机高性能的标量控制方法;提出了一种基于模糊决策的采样频率闭环控制策略,保持较好的电流跟踪品质以及较高的系统效率。论文有理论深度和实用价值,选题接触学科前沿。

作者对永磁电机及其控制领域内的研究现状及技术水平有充分了解,论文研究理论联系实际,具有创新成果。

论文条理清楚,层次分明,内容丰富充实,表明作者具有坚实宽广的基础理论和系统深入的专门知识,很强的独立从事科学研究工作的能力。论文水平达到了博士论文要求。答辩过程,表述清楚,回答问题正确。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过崔巍同学的博士学位论文答辩,建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席: **贺益康**

2004 年 7 月 9 日

摘 要

本文从电机以及控制技术整体结合的角度出发,提出了一种具有各相解耦特点的自控式永磁同步电机(DPMSM).该新型电机在磁路结构上实现了电机各相磁路间的解耦,在很大程度上降低了 PMSM 的强耦合性,增强了电机的可控性.本论文以 DPMSM 电机为主要对象,着重进行正弦波 DPMSM 的设计和驱动控制两方面的研究.

从电机设计的角度出发,本文采用特殊的齿槽数目配合以及绕组设计规律实现了电机各相磁路的解耦.针对高性能驱动系统对动态响应性能的要求,本文提出了一种具有辅助磁极的新型聚磁式转子结构,利用永磁隔磁技术有效抑制转子漏磁并能显著提升气隙磁通密度,有利于实现良好的动态响应.文中对采用不同永磁材料作为辅助磁极的转子结构及其对漏磁抑制以及气隙磁通密度等性能的影响进行了深入分析.针对电机反电势偏离理想波形造成转矩脉动的问题,本文从电机本体设计出发在绕组设计,转子偏心气隙设计及转子磁路结构优化等三个方面对反电势正弦化设计方法进行了深入研究.最后通过样机的仿真以及实验验证了上述设计规律的正确性.

由于DPMSM各相绕组之间的互感远远小于自感,DPMSM 特殊工作原理使其在控制技术上存在特殊性.基于DPMSM各相独立的特点,本文提出了基于标量概念的各相独立的恒转矩和恒功率控制策略.在恒转矩运行区域,无需借助矢量变换,通过控制各相电流即可实现各相独立的转矩直接控制.在恒功率运行

时,本文采用相电流相位超前反电势的方法,利用绕组电抗电势削弱反电势来解决电流控制失效的问题,有效扩展了高速运行范围.针对电流控制中直流母线电压利用率较低的问题,本文中采用相电压相位超前控制技术,有效提高恒功率运行时逆变器最大输出电压,从而达到进一步扩展高速运行范围的目的.系统实际运行时,通过基波分析法获取电压控制的初始相位超前角,利用效率最佳算法在线修正相位超前角使得在特定运行条件下的系统输入功率最小,确保恒功率运行时具有较高效率.

高性能正弦电流跟踪控制技术是确保 DPMSM 驱动系统静、动态控制性能的关键.本文中设计并实现了一种基于高速 MOSFET 器件的高性能电流控制器,同时给出了运行模式以及相应的硬件设计方法.在大量实验结果的基础上,本文对影响电流控制器电流跟踪性能的各种因素进行了具体分析.针对整个驱动系统运行范围内电流控制器采用固定采样频率难以满足高性能电流跟踪和降低开关频率的双重要求的问题,首次提出了一种基于模糊决策的采样频率闭环控制策略.根据驱动系统运行条件不同,自动调节采样频率可以在不同电机运行状况下使系统都能保持较高效率以及较好的电流跟踪品质.

针对转子位置传感器成本较高,限制了正弦波驱动技术在低成本驱动系统中的应用的问题,本文对采用连续转子位置预估技术的低成本 DPMSM 正弦波驱动技术进行了研究.文中给出了低成本连续转子位置预估技术原理和具体实现过程,并对造成预估误差的各种因素进行了具体分析.其次在基于转子位置预估技术基础上,本文相应提出了两种具有低成本特点的驱动控制策略适用于不同应用场合,可以实现具有较高性价比的正弦驱动系统.

关键词 DPMSM, 各相独立转矩直接控制, 恒功率控制, 电流控制, 低成本正弦驱动

Abstract

From the angle of integrity of motor and its control technique, a novel self-controlled permanent magnetic motor with the phase-decoupling (DPMSM) characteristic is put forward in the paper. The decoupling between the magnetic circuits of different motor phases is accomplished in the motor, thus lowering the strong decoupling characteristic and improving the control performance of PMSM. This paper focuses on the research of the design and control technique of DPMSM.

From the angle of motor design, a special matching pattern of tooth and slot numbers and winding arrangement are employed to accomplish the decoupling between the magnetic circuits of motor phases. According to the demand of high-performance drive system in dynamic response, a novel magnetism-focusing rotor structure with auxiliary magnetic poles is put forward, in which the rotor magnetic flux leakage is effectively curbed and the magnetic flux density in the air-gap is remarkably strengthened leading to the improvement of dynamic response. An in-depth analysis about the influence on the curbing effect of magnetic flux leakage and improvement of air-gap magnetic flux density by using different types of magnetic materials are conducted in the paper. Aiming at the torque ripple caused by the departure of emf from idle waveform, an in-depth research on the optimizing design technique of emf from

the aspects of winding design, eccentric air-gap design and rotor magnetic circuit structure design. In the end, the feasibility and correctness of the design principles are validated through the simulation and experiment results of the sample motor.

DPMSM can not meet the presuppositions of the park transformation due to the fact that the mutual inductance is far more less than the self inductance. The special working principal of DPMSM leads to the particularity in its control technique. According to the phase-decoupling characteristic of DPMSM, a novel control strategy of constant torque and constant power operation based on the scalar conception is put forward. In constant torque region, the phase-independent direct torque control can be obtained by controlling the motor current of each phase without resort to vector transformation. In constant power region, a new conception of utilizing the voltage on the phase inductance to counter the emf by the technique of phase current pre-conduction against the phase emf is put forward. Thus, the invalidation of current control in the high-speed region can be avoided, leading to the expansion of speed range. Aiming at the low utilization of DC voltage in the current control, a pre-conduction of phase voltage against emf is also put forward, in which the maximum output voltage of inverter can be increased leading to a wider speed control range than the current pre-conduction control. During the operation, an initial pre-conduction angle is obtained according to the fundamental component analytical method. The online adjustment of the pre-conduction angle is employed to ensure that the input power is minimum.

High performance sine-wave current tracing technique is the key to ensure the steady and dynamic control performance of DPMSM. A high performance current controller based on the fast switching MOSFET is designed and realized. The design approaches of the operation pattern and hardware system is also given. Based on the experiment results, the factors influencing the current control performance are analyzed. Aiming at the contradiction between high performance current control and low switching loss, a closed-loop control of sample frequency employing fuzzy decision is put forward. According to the different operation conditions of the driving system, the auto-adjustment of sample frequency can ensure that the driving system possess high efficiency and high current control performance during all the operation range.

Aiming at the limitation of the sine-wave driving technique in low cost applications due to the reason of high cost rotor position sensor, a research on the continuous rotor estimation technique and related low cost sine-wave driving technique is conducted. The working principal of low cost rotor estimation and its realization process are given in the paper as well as the analysis on the estimation error. Based on the rotor position estimation technique, two low cost driving strategies suitable for various applications are also put forward, which can accomplish low cost sine-wave driving system with high price performance.

Key words DPMSM, scalar control, constant power operation, current tracing control, low cost sine-wave driving

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 永磁电机发展概述	1
1.2 自控式永磁交流电机	4
1.3 永磁交流电机在高性能驱动系统中的应用	6
1.4 永磁同步电机及其控制技术的主要研究问题	7
1.5 本文研究工作的背景和内容安排	13
1.6 本章小结	16
第二章 DPMSM 的设计研究	17
2.1 DPMSM 的设计研究	17
2.2 DPMSM 样机的研制与试验结果	34
2.3 本章小结	44
第三章 DPMSM 驱动控制技术研究	45
3.1 各相独立的转矩直接控制	45
3.2 DPMSM 恒功率控制技术研究	54
3.3 本章小结	74
第四章 基于模糊原理的高性能电流控制器设计	76
4.1 电流滞环控制	76
4.2 Delta 调制电流控制器设计	81
4.3 基于模糊原理的 Delta 调制电流控制器	97
4.4 本章小结	110
第五章 高性能 DPMSM 驱动系统的设计与实现	111
5.1 驱动系统实验平台	111
5.2 控制系统	112

5.3 软件设计	124
5.4 实验结果	129
5.5 本章小结	137
第六章 低成本 DPMSM 正弦波驱动技术的研究	138
6.1 应用背景	138
6.2 低成本位置检测技术	139
6.3 低成本的驱动控制策略	145
6.4 低成本 DPMSM 驱动系统设计与实现	148
6.5 实验与分析	150
6.5 本章小结	156
第七章 总结	158
附录 A DPMSM 的稳态数学模型	161
参考文献	167
致 谢	177

第一章 绪 论

1.1 永磁电机发展概述

1.1.1 永磁电机发展历史^[1,2]

永磁电机是利用永磁体产生的磁场来进行机械能和电能相互转换的电磁装置。早在 19 世纪 20 年代,世界上出现的第一台电机就是由永磁体产生励磁磁场的永磁电机。不过当时采用磁能密度很低的天然磁铁作为永磁体,因此电机的体积颇为庞大,不久即被电励磁电机所取代。

随着人们对永磁材料的机理、构成和制造技术逐渐深入的研究,特别是在 1967 年,美国道尔顿大学的 Strnat 教授采用烧结法制成了第一块钴基稀土永磁体,从而使永磁电机的发展进入一个全新的历史时期。这种稀土永磁的高剩磁密度、高矫顽力、高磁能积和线性退磁曲线等优异磁性能使其特别适合于永磁电机的应用,所以在 20 世纪 70 年代引起了从事电机及驱动系统技术的学者和研究人员以及产业界的普遍注意和重视。英国学者 Merrill 最先提出了永磁式交流电机的设计方案。德国西门子公司首次研制成功了著名的内嵌式转子结构永磁电机。高磁能积的永磁材料工业的进步和发展极大地促进了永磁电机的发展。

1983 年,日本住友金属株式会社和美国通用汽车公司分别

研制成功第三代稀土永磁体(NdFeB). 这种材料由钕、铁、硼三种元素构成, 采用廉价的铁取代了昂贵的金属钴, 因此这种稀土永磁体具有相对低廉的价格. 钕铁硼永磁材料具有最高的磁性, 其室温下的剩磁密度 $B_r=1.30\text{ T}$, 矫顽力 $H_c=987\text{ kA/m}$, 最大磁能积 $(B \cdot H)_{\max}=318\text{ kJ/m}^3$. 在价格相对较低的钕铁硼永磁材料出现之后, 世界各国的学者和产业界的研究开发重点逐渐转移到工业和民用电机应用领域. 永磁材料性能的不断提高和完善, 尤其是钕铁硼永磁材料的热稳定性和耐腐蚀性的改善和价格的逐步降低, 使得钕铁硼永磁材料在电机中得到了广泛的应用. 以稀土钕铁硼永磁电机为代表的高磁场永磁电机, 以其具有体积小、重量轻、效率和功率因数高等明显特点纷纷取代了许多传统的电励磁电机, 而且实现了传统电励磁电机所难以达到的高性能, 被广泛地应用在国防、工业、农业和民用等各个领域. 我国稀土资源的储量占世界蕴藏量的 80% 以上, 充分发挥我国稀土资源丰富的优势, 大力研究和推广应用以稀土永磁电机为代表的各种永磁电机对提高我国电机工业发展水平具有重要意义.

1.1.2 功率变换技术、微电子技术与永磁电机电气传动控制

包括永磁电机在内的交流电机控制技术与功率变换技术、微电子技术的发展紧密相关. 电力电子技术和微处理器技术的发展是包括永磁电机在内的现代交流调速技术发展的物质基础, 也是推动永磁电机及其控制技术不断发展更新的强大动力.

1.1.2.1 功率变换技术^[3-5]

与其他交流调速系统一样, 永磁电机驱动系统中的功率变换器在调速系统中起到弱电控制强电的纽带作用. 功率变换器由电力电子器件构成, 功率变换技术以电力电子器件的功率等级和性能作为其发展标志.