

2000 年上海大学博士学位论文

14

交流异步电动机 按定子磁链定向的电流矢量控制

作者：谢鸿鸣

专业：控制理论和控制工程

导师：陈伯时



3.012

上海大学出版社

责任编辑 樊均幼

封面设计 王悦生

SHANGHAI UNIVERSITY DOCTORAL DISSERTATION (2000)

**THE CURRENT VECTOR CONTROL
STRATEGY FOR INDUCTION
MOTORS WITH STATOR FLUX ORIENTATION**

Candidate: Xie Hongming

Major: Control Theory and Control Engineering

Supervisor: Prof. Chen Boshi

ISBN 7-81058-275-5



9 787810 582759 >

ISBN 7-81058-275-5/G·049

全套定价: 160.00 元

188

70/342/10
764

2000 年上海大学博士学位论文

交流异步电动机 按定子磁链定向的电流矢量控制

作 者：谢鸿鸣

专 业：控制理论和控制工程

导 师：陈伯时



A0977915

上海大学出版社

• 上 海 •

Shanghai University Doctoral Dissertation (2000)

**The Current Vector Control
Strategy for Induction
Motors with Stator Flux Orientation**

Candidate: Xie Hongming

Major: Control Theory and Control Engineering

Supervisor: Prof. Chen Boshi

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：**陈敏逊** 教授，上海交通大学电子信息学院 200030

委员：**周国兴** 教授，同济大学电气工程系 200092

龚幼民 教授，上海大学机电自动化学院 200072

陶生桂 教授，上海铁道大学电气工程系 200331

陈国星 教授，上海大学 200072

邬正康 教授，上海铁道大学电气工程系 200331

周兆敏 教授，上海大学机电自动化学院 200072

导师：**陈伯时** 教授，上海大学机电自动化学院 200072

评阅人名单:

陈敏逊	教授, 上海交通大学电子信息学院	200030
邵丙衡	教授, 上海铁道大学电气工程系	200331
周国兴	教授, 同济大学电气工程系	200092

评议人名单:

许镇琳	教授, 天津大学自动化系	300072
陈 坚	教授, 湖北武汉市华中理工大学电力系 应用电子技术教研室	430074
贺益康	教授, 浙江大学玉泉校区电机系	310027
马小亮	教授级高工, 天津电气传动设计研究所	300180
苏彦民	教授, 西安交通大学电气工程学院	710049
杨 耕	教授, 北京朝阳区安苑东里1区8楼3-301	100029

答辩委员会对论文的评语

谢鸿鸣同学在博士论文《交流异步电动机按定子磁链定向的电流矢量控制》中,针对目前在交流变频调速系统中广泛应用的矢量控制技术与直接转矩控制技术的不足之处,提出一种既能综合两种技术的优点,又能克服各自缺点的新型控制策略。论文研究内容属电力传动控制领域前沿课题,论文的研究成果具有理论价值和应用前景。

论文的主要贡献表现在以下几个方面:

系统地分析了异步电机各种动态等值电路和转矩表达式,为确定控制方案奠定了理论基础。

提出异步电机按定子磁链定向的电流矢量控制方案,避免了转子电阻对系统的影响,提高了系统的鲁棒性。采用转矩连续控制,减少了转矩脉动,提高了调速范围。论文的该项工作有创造性,基本达到了对两种控制技术取长补短的目的。

分析了三种定子磁链计算方法,指出了各种方法的特点。

研制了基于 DSP 的实验系统,验证了方案的可行性与正确性。

以上工作表明,论文作者较好地掌握了本学科坚实宽广的基础理论和系统深入的专门知识,具有较强的独立科学研究能力。

在答辩中能正确地回答所提出的问题。

答辩委员会表决结果

经答辩委员会无记名投票，一致同意通过论文答辩，并建议授予工学博士学位。

答辩委员会主席：**陈敏逊**

2000 年 1 月 23 日

摘 要

异步电机因自身结构问题造成其转子侧参数具有易变难测的特点,使得任何建立于电机数学模型基础之上且利用转子参数进行变量计算的调速系统性能都或多或少地受转子参数变化的影响。

采用定子磁链控制能有效地提高系统对转子侧参数的鲁棒性,其原因在于定子磁链观测模型可以避免转子参数的引入,模型的唯一参数是较易在线测量的定子电阻,从而在理论上保证了磁链观测结果的强鲁棒性。目前,建立于电机动态模型之上的定子磁链控制方法有直接转矩控制(DTC)、间接自控制(ISR)和直接定子磁链定向控制(DSFO),它们采用了不同的控制手段,表现出的性能也不同。但DTC由于砰-砰控制影响了低速性能,ISR和DSFO仍然避免不了对转子参数的依赖。

本文依据异步电机动态模型,在分析电机内部电流及磁链关系的基础上,提出异步电机按定子磁链定向的电流矢量控制方案,在保持较高动态特性的前提下,基本消除了转子参数对调速系统控制性能的影响,成为一种既综合了矢量控制和直接转矩控制的优点,又克服了它们各自的主要缺点的异步电动机高动态性能强鲁棒性的新型控制方案。研究的主要内容有:

研究了异步电机的动态数学模型,通过选择转子量到定子侧折算的不同方法,获得由不同状态变量表示的电机模型状态方程,随之得到不同形式的动态等值电路。

根据磁场加速法原理, 在理论上定性地分析了电机转子参数对矢量控制系统性能的影响。结合定子磁链控制, 提出异步电机基于定子磁链幅值恒定的电压矢量控制方案, 并对该方案的非线性局限进行了分析。

分析了电机内部电流及磁链的关系, 提出异步电机按定子磁链定向的电流控制方案, 通过分别调节定子电流的力矩分量及与磁链幅值相关的横轴分量, 使系统在保持高动态响应下实现转矩的连续平滑控制, 同时避免了对转子电阻、转子时间常数的依赖, 提高了系统的鲁棒性。

首次运用数学手段详细分析了定子磁链的间接观测方法, 对各种观测方法的本质进行了较为严密的说明。

从理论上分析了变频器死区效应、 $\frac{dv}{dt}$ 和高次谐波对系统性能、电机及外部设备的影响。并给出了若干减少变频器负面影响的对策。

结合 TI 公司的 TMS320F240 EVM, 建立了异步电机按定子磁链定向的电流控制调速装置。在这基础上的一系列试验说明控制系统具有较好的动、静态性能和较高的抗负载扰动能力。

关键词 矢量控制, 直接转矩控制, 间接自控制, 直接定子磁链定向控制, 磁场加速法, 鲁棒性, 变频器, 死区效应, 谐波

Abstract

It is well known that the rotor parameters in induction motor are subjected to variability and hard to be measured, which more or less deteriorate the performance of such control systems based on the mathematical model depending upon rotor parameters.

One method to improve the robustness of control system is to employ stator flux control. The main reason is that the only parameter in stator flux model is the stator resistance, which can be measured on line. Thus better robustness in flux observation can be ensured in theory. Up to now, several motor control systems with stator flux control based on dynamic models are developed, such as direct torque control (DTC), indirect self-regulation (ISR) and direct stator flux orientation control (DSFO). Because of various control means, their control performances are dissimilar. As for bang-bang control, DTC has poor performance in low speed range. ISR and DSFO can not completely avoid the dependence upon rotor parameters.

This paper present a novel control scheme: the current vector control strategy for induction motors with stator flux orientation (CCSFO), which not only can avoid the dependence upon rotor resistance and rotor time constant, but also remain high dynamic performances. It becomes a new control strategy, which combines the advantages of VC(vector control) and DTC, at the same time overcomes their defects. The main contents and conclusions are as follows:

The dynamic model of induction motor is investigated. Various equivalent circuits and state equations are proposed by using different

methods of conversion for parameters from rotor side to stator side.

According to the flux acceleration principle, the influence of rotor parameters on the performance of vector control system with rotor flux orientation is analyzed. Then a voltage vector control scheme for induction motors based on constant stator flux is presented and its nonlinear limitations are analyzed.

Based on the analysis of the relationship between current and flux variables in induction motors, a stator flux-oriented current control scheme is presented instead of voltage vector control. This novel scheme achieves circular stator flux track and continuous torque regulation, which produce less torque ripples than that in DTC. It also reduces dependence on rotor parameters, and is especially insensitive to rotor resistance variation, thus robustness of the system is improved.

The stator flux observation models are studied to indicate their advantages and disadvantages. Some new observation methods are introduced.

The effects of inverter dead-time, $\frac{dv}{dt}$ and high ordered harmonics on performance of control system, on the motor and on other outside equipment are analyzed. Some strategies of restraining these negative influences are given.

Implementation of stator flux-oriented current control system on TMS320F240 EVM is made. Lots of experiments in lab show its good dynamic and static performances. The excellent ability to resist the disturbance of load is also shown.

Key words vector control. direct torque control. indirect self-regulation, direct stator flux orientation control. flux acceleration principle. robustness. inverter. dead-time effect. harmonics

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 电力电子、微电子技术与交流电气传动控制	2
1.3 交流异步电动机的控制策略	6
1.4 交流异步电动机定子磁链控制的发展	19
1.5 本论文的研究背景及主要成果	23
第二章 交流异步电动机的数学模型和等值电路	25
2.1 电机模型分析中的数学基础	26
2.2 三相交流异步电动机的基本动态数学模型	29
2.3 异步电动机的动态等值电路	41
2.4 交流异步电动机在数字仿真中的实现	47
2.5 本章小结	53
第三章 交流异步电动机基于定子磁链的新型控制策略	54
3.1 转子参数变化对矢量控制的影响	55
3.2 异步电机基于定子磁链幅值恒定的电压 矢量控制	58
3.3 异步电机基于定子磁链幅值恒定的电压矢量 控制非线性分析	65
3.4 异步电机按定子磁链定向的电流矢量控制	70
3.5 本章小结	82

第四章 异步电机定子磁链间接观测法的研究	84
4.1 常规的三种定子磁链观测方法之研究	84
4.2 提高定子磁链观测精度的新思路	97
4.3 本章小结	101
第五章 变频器对系统产生的若干影响	103
5.1 变频器对控制系统性能的影响	103
5.2 变频器对电机性能的影响	111
5.3 变频器对外部设备的影响	114
5.4 减轻与防止高次谐波影响的方法	116
5.5 本章小结	120
第六章 基于 DSP 的异步电机定子磁链定向的电流 矢量控制实验装置设计	122
6.1 控制系统总体结构	122
6.2 TMS320F240 EVM 板	124
6.3 硬件电路设计	133
6.4 系统控制软件设计	145
6.5 实验结果及分析	152
6.6 本章小结	176
第七章 结论与展望	178
参考文献	182
致 谢	188

第一章 绪 论

1.1 引 言

电动机是电能向机械能转换的能量载体^[1,2],在工业、农业、交通运输以及日常生活中广泛地应用着电机传动.其中许多机械有调速的要求,其主要目的一方面是为了满足运行、生产、工艺的要求,另一方面是为了减少运行损耗、节约电能.由此产生了电机传动的调速技术,即电气传动控制技术.

电机分直流电机和交流电机两大类.交流电机,特别是笼型异步电机,由于其结构简单牢固、制造成本低廉、运行方便可靠、环境适应能力强以及易于向高电压、高转速和大容量方向发展等优点,在工农业生产中得到了极广泛的应用,但交流电机调速比较困难,其原因在于它具有多变量、非线性、强耦合的特性,控制起来较直流电机复杂^[3].如何使交流电机具有与直流电机一样的控制特性,一直是人们不断探索和追求的目标.矢量控制技术的提出以及实用化,使得交流电气传动控制系统的性能达到了直流电气传动控制系统的水平,交流调速技术发生了质的飞跃.因此,交流电气传动控制技术也随之逐渐成为主流.在矢量控制之后又提出了非线性解耦控制、直接转矩控制以及智能控制等不同的先进控制策略,推动着交流电气传动控制技术不断继续向前发展.

随着现代科技的进步,近几十年来,微电子技术、计算机技术以及电力电子技术的飞速发展,为交流电气传动控制的进步提供了技术保障;而控制理论的发展则为人们制定先进的交流异步电机控制策略提供了理论依据。今天,交流电气传动控制技术已经发展成为多门技术、多学科相互交叉的新学科^[4-6]。

1.2 电力电子、微电子技术与交流电气传动控制

早在半个多世纪以前,对现在常用的诸如变电压、串级、变压变频等交流调速方法的原理就已经确立了,只是由于要用电磁元件和旋转变流机组来实现,而控制性能又不及直流调速,所以交流调速的使用在当时受到了限制。到了 60~70 年代,随着半控电力电子器件晶闸管(SCR)的问世,有了静止的电力电子变流装置以后,逐步解决了调速装置要减少设备、缩小体积、降低成本、提高效率、消除噪声等问题,才使交流调速获得了飞跃的发展。发明矢量控制以后,又提高了交流调速系统的静、动态性能,但实现时需要复杂的模拟电子电路,其设计、制造和调试都很麻烦,采用微机控制,用软件实现矢量控制算法,使硬件电路规范化,从而既降低了成本又提高了可靠性,而且还有可能进一步实现更复杂的控制技术^[7]。

● 电力电子器件在交流调速系统中的主要应用是构成电力电子变换器,起弱电控制强电的纽带作用^[88,89]。

1970 年晶闸管被用作逆变器主回路的开关元件开创了电力电子器件在电机调速系统中应用的局面,其后,随电子技术的发展和制造工艺的提高,生产出了许多不同种类不同型号的电力电子器件来满足调速系统的需要,至今,电力电子器件的发展大体上已经历了三个平台:①晶闸管 SCR,②门极可关断晶