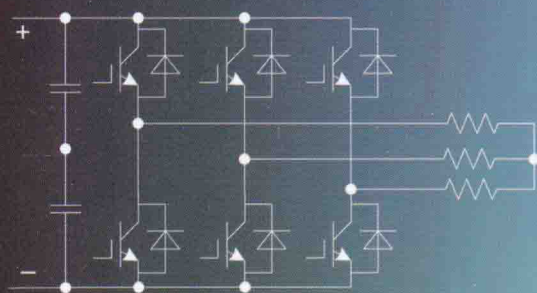


“十二五”国家重点图书出版规划项目

电力电子
新技术系列图书

New Technology Series in
Power Electronics



◎ 张永昌 张虎 李正熙 编著

异步电机 无速度传感器 高性能控制技术

YIBU DIANJI WUSUDU CHUANGANQI
GAOXINGNENG KONGZHI JISHU



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目

电力电子新技术系列图书

异步电机无速度传感器 高性能控制技术

张永昌、张虎、李正熙 著

张永昌 张 虎 李正熙 编著



机械工业出版社

无速度传感器技术和闭环高性能控制技术在变频调速中得到了广泛研究和应用,是现代交流传动系统的研究热点。本书以工业界应用最为广泛的三相异步电机为对象,深入介绍了无速度传感器和高性能控制技术在异步电机变频调速系统中的理论研究和实际应用。对异步电机的各种高性能闭环控制策略和速度磁链估计方法进行了详细分析和实验验证,包括电机参数自整定、直接矢量控制、间接矢量控制、定子磁场定向控制、直接转矩控制、间接转矩控制、开环速度磁链估计和速度自适应磁链观测器等。本书中不仅包括理论分析,还给出了详细的仿真建模和两电平、三电平逆变器平台上的实验结果,方便读者对控制算法进行深入研究和验证。

本书将理论分析和实践验证相结合,既可以作为电力电子与电力传动专业高年级本科生和研究生的教材,又可供电机控制领域的科研工作者和工业实践开发人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

异步电机无速度传感器高性能控制技术/张永昌,张虎,李正熙编著. —北京:机械工业出版社,2015.1

(电力电子新技术系列图书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-111-48482-0

I. ①异… II. ①张…②张…③李… III. ①异步电机-自动控制
IV. ①TM343

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第260965号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:张俊红 版式设计:霍永明

责任校对:闫玥红 封面设计:马精明 责任印制:乔宇

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2015年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·16.75印张·334千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-48482-0

定价:59.80元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:(010) 88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:(010) 68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

(010) 88379203

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

第2届 电力电子新技术系列图书 编辑委员会

主任：徐德鸿

副主任：白继彬 牛新国 康勇 李崇坚 杨耕

委员：(按姓名拼音字母排序)

白继彬 陈坚 陈道炼 陈守良 陈治明

高艳霞 郭宏 郭世明 康勇 李崇坚

李永东 刘进军 吕征宇 牛新国 潘三博

阮新波 孙流芳 孙玉坤 王旭东 王兆安

肖湘宁 徐德鸿 徐殿国 杨耕 杨旭

张波 张卫平 张兴 张承慧 查晓明

赵善麒 赵争鸣 钟彦儒 周波 周维维

秘书组：陈守良 孙流芳 杨旭 罗莉

电力电子新技术系列图书

序 言

1974年美国学者 W. Newell 提出了电力电子技术学科的定义, 电力电子技术是由电气工程、电子科学与技术和控制理论三个学科交叉而形成的。电力电子技术是依靠电力半导体器件实现电能的高效率利用, 以及对电机运动进行控制的一门学科。电力电子技术是现代社会的支撑科学技术, 几乎应用于科技、生产、生活各个领域: 电气化、汽车、飞机、自来水供水系统、电子技术、无线电与电视、农业机械化、计算机、电话、空调与制冷、高速公路、航天、互联网、成像技术、家电、保健科技、石化、激光与光纤、核能利用、新材料制造等。电力电子技术在推动科学技术和经济的发展中发挥着越来越重要的作用。进入 21 世纪, 电力电子技术在节能减排方面发挥着重要的作用, 它在新能源和智能电网、直流输电、电动汽车、高速铁路中发挥核心的作用。电力电子技术的应用从用电, 已扩展至发电、输电、配电等领域。电力电子技术诞生近半个世纪以来, 也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前, 电力电子技术仍以迅猛的速度发展着, 电力半导体器件性能不断提高, 并出现了碳化硅、氮化镓等宽禁带电力半导体器件, 新的技术和应用不断涌现, 其应用范围也在不断扩展。不论在全世界还是在我国, 电力电子技术都已造就了一个很大的产业群。与之相应, 从事电力电子技术领域的工程技术和科研人员的数量与日俱增。因此, 组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列图书, 以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考, 促进电力电子技术及应用知识的普及。

在 20 世纪 80 年代, 电力电子学会曾和机械工业出版社合作, 出版过一套电力电子技术丛书, 那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近, 电力电子学会经过认真考虑, 认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此, 成立了专门的编辑委员会, 负责确定书目、组稿和审稿, 向机械工业出版社推荐, 仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色:

本系列图书属专题论著性质, 选题新颖, 力求反映电力电子技术的新成就和新经验, 以适应我国经济迅速发展的需要。

理论联系实际, 以应用技术为主。

本系列图书组稿和评审过程严格, 作者都是在电力电子技术第一线工作的专家, 且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出, 条理清晰, 语言通俗, 文笔流畅,

便于阅读学习。

本系列书编委会中，既有一大批国内资深的电力电子专家，也有不少已崭露头角的青年学者，其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助，并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

电力电子新技术系列图书 编辑委员会

前 言

电机是电能消耗的最大户，据统计，2011年我国电机总耗电量约30000亿千瓦时，占社会总用电量的64%，其中工业电机用电量在工业用电的比例更高达75%。各种电机中应用最多的是三相交流笼型异步电动机。交流异步电机本身是一个多变量、强耦合、高阶的非线性系统，过去由于电力电子器件的制造水平和电机控制理论发展程度的限制，很难实现对交流异步电机的高性能闭环控制，一般是采用直流调速。直到20世纪70年代，德国西门子公司的Blaschke工程师首次提出了异步电机磁场定向控制的概念，奠定了矢量控制系统的基础，从此异步电机高性能控制成为可能。20世纪80年代，德国鲁尔大学的M. Depenbrock教授首次提出了直接转矩控制理论，相比矢量控制无需电流环和旋转坐标系变换，结构简单且动态响应快，实现了交流电机控制理论的第二次飞跃。现在矢量控制和直接转矩控制已经在各种功率等级和拓扑结构的变频器中得到应用，其中矢量控制更是已经成为工业传动的标准。针对某些不适合安装速度传感器的恶劣场合，为了提高可靠性和降低成本，目前，无速度传感器技术已经成为交流调速系统的研究热点，在矢量控制和直接转矩控制中得到应用并且还在不断发展之中。本书以工业界应用最广泛的笼型异步电机为对象，结合作者自身的研究和工作经验，对异步电机高性能无速度传感器控制进行了系统深入的介绍。书中除了理论分析外，对各种控制方法和策略都配有详细的仿真结果和经作者亲自验证过的实验测试结果，方便读者深入分析和验证，不仅对科研工作者，对相关领域的工程技术人员也有很好的参考价值。

本书共有8章，各章内容安排如下：第1~3章对目前主流的电机高性能闭环控制和无速度传感器技术的发展现状、参照系理论和任意参考坐标系下的异步电机数学模型，以及异步电机驱动常用的两电平和三电平逆变器的拓扑结构、工作原理和调制技术进行介绍；第4章介绍了异步电机参数自整定技术，包括离线自整定和在线自整定，采用的方法包括迭代求解非线性方程组和递推最小二乘法等；第5章介绍了本书第一种高性能闭环控制策略——矢量控制，包括基本原理、电压解耦控制、调节器整定等内容；第6章是无速度传感器技术，介绍了开环速度磁链估计器和闭环的速度自适应磁链观测器，包括龙贝格观测器、滑模观测器和扩展卡尔曼滤波观测器等；第7章详细介绍了三电平逆变器驱动下的异步电机无速度传感器高性能控制，包括直接矢量控制、优化矢量表直接转矩控制、离散空间矢量调制直接转矩控制、空间矢量调制直接转矩控制（定子磁场定向控制）、间接转矩控制以及它们的无速度传感器运行，尤其针对三电平逆变器驱动异步电机时的特殊问题，如PWM技术和中点平衡进行了研究；第8章以两电平通用变频器和高效率洗衣机变

频器的研制为例介绍了无速度传感器异步电机调速系统的研制和应用,包括硬件设计、软件设计和系统调试,给出了完整的系统框图和实验结果供读者参考。

本书由张永昌编写第1~3章和6~7章,张虎和李正熙编写第4~5章和8章,全书由张永昌负责统筹和定稿。在编写本书过程中,作者的研究生做了大量编辑和校对工作,他们是李政学、杨海涛、高素雨、田文丹和东子昭,在此一并表示感谢。另外,本书第一作者要感谢他在清华大学攻读博士学位时导师赵争鸣教授的悉心指导,以及在澳大利亚悉尼科技大学从事博士后研究时朱建国教授的帮助和支持;本书第二作者要感谢他在北京科技大学攻读博士学位时导师童朝南教授的指导帮助。

本书的部分内容是在国家自然科学基金(编号51207003)的资助下完成的,在此深表谢意。本书可供电机控制领域的科研工作者和工业实践开发人员参考,也可以作为电力电子与电力传动专业高年级本科生和研究生的教材。

由于作者水平有限,且编写时间仓促,而电机闭环控制和无速度传感器技术仍在快速发展之中,书中难免有不足和错误之处,敬请读者批评指正。

编者
2015年初

电力电子新技术系列图书

目 录

- 异步电机无速度传感器高性能控制技术 张永昌、张虎、李正熙编著 (已出版)
- 矩阵式变换器技术及其应用 孙凯、周大宁、梅杨编著 (已出版)
- 逆变焊机原理与设计 张光先等编著 (已出版)
- 高压直流输电原理与运行 韩民晓、文俊编著 (已出版)
- 宽禁带半导体电力电子器件及其应用 陈治明、李守智编著 (已出版)
- 交流电动机直接转矩控制 周扬忠、胡育文编著 (已出版)
- 开关电源的实用仿真与测试技术 陈亚爱编著 (已出版)
- 新能源汽车技术 康龙云编著 (已出版)
- 脉冲功率器件及其应用 余岳辉、梁琳、彭亚斌、邓林峰编著 (已出版)
- 电力电子技术在汽车中的应用 王旭东、余腾伟编著 (已出版)
- 开关稳压电源的设计与应用 裴云庆、杨旭、王兆安编著 (已出版)
- 太阳能光伏并网发电及其逆变控制 张兴、曹仁贤、张崇巍编著 (已出版)
- 高频开关型逆变器及其并联并网技术 孙孝峰、顾和荣、王立乔、邬伟扬编著 (已出版)
- 电力半导体器件原理与应用 袁立强、赵争鸣、宋高升、王正元编著 (已出版)
- 机车动车交流传动技术 郭世明编著 (已出版)
- PWM 整流器及其控制 张兴、张崇巍编著 (已出版)
- 电压源换流器在电力系统中的应用 同向前、伍文俊、任碧莹编著 (已出版)
- 高压直流输电原理与运行 (第2版) 韩民晓、文俊等编著 (已出版)
- 现代整流器技术——有源功率因数校正技术 徐德鸿、李睿、刘昌金、林平编著 (已出版)
- 高性能级联型多电平变换器原理及应用 周京华、陈亚爱编著 (已出版)
- 新能源并网发电系统的低电压故障穿越 耿华、刘淳、张兴、杨耕编著 (已出版)
- 电力电子新器件及其制造技术 王彩琳编著
- 船舶电力推进系统 汤天浩、韩朝珍主编
- 固态感应加热电源技术及其应用 陈辉明、金天均、李胜川编著
- 电能质量控制技术 查晓明、孙建军、宫金武编著
- 功率变换器高频磁技术及其应用 陈为编著
- 双馈风力发电交流控制技术 杨淑英、张兴、曹仁贤、张崇巍编著
- 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 设计和制造 赵善麒、高勇、王彩琳编著

编著图书推荐表

姓名		出生年月		职称/职务		专业	
单位				E-mail			
通讯地址						邮政编码	
联系电话				研究方向及教学科目			
个人简历(毕业院校、专业、从事过的以及正在从事的项目、发表过的论文):							
您近期的写作计划有:							
您推荐的国外原版图书有:							
您认为目前市场上最缺乏的图书及类型有:							

地址: 北京市西城区百万庄大街 22 号 机械工业出版社电工电子分社

邮编: 100037 网址: www.cmpbook.com

联系人: 张俊红 电话: 13520543780 010-68326336 (传真)

E-mail: buptzjh@163.com (可来信索取本表电子版)



目 录

电力电子新技术系列图书序言 前言

第1章 异步电机控制概述	1
1.1 引言	1
1.2 电力电子技术的发展	3
1.2.1 电力电子器件及其发展	3
1.2.2 电动机控制用功率变换器	5
1.2.3 PWM 技术及发展	7
1.3 微处理器的发展	10
1.4 电机控制理论的发展	11
1.4.1 经典电机控制方法	11
1.4.2 现代控制理论在电机控制中 的应用	13
1.4.3 电机参数辨识	18
1.4.4 电机速度和磁链观测	20
1.5 本书内容	24
参考文献	25

第2章 异步电机数学模型

2.1 三相静止坐标系下的电机模型	34
2.2 参照系理论	39
2.2.1 引言	39
2.2.2 静止参照系和任意参照系 之间的变换关系	39
2.2.3 常用参照系与不同参照系 之间的变换	41
2.3 任意参照系下的电机模型	43
2.3.1 两相静止坐标系下的电机 模型	43
2.3.2 两相同步坐标系下的电机 模型	45
2.3.3 状态方程描述	46

2.4 小结	50
参考文献	50

第3章 异步电机驱动用电力电子 变换器及调制技术

3.1 概述	51
3.2 两电平电压型逆变器及调制 技术	51
3.2.1 两电平拓扑及工作原理	51
3.2.2 空间矢量调制技术	54
3.3 三电平电压型逆变器与调制 技术	56
3.3.1 三电平拓扑和 PWM 技术	56
3.3.2 三电平载波 PWM 技术	58
3.3.3 三电平 SVPWM 技术	61
3.3.4 三电平 SHEPWM 技术	66
3.4 基于同步优化脉冲调制的闭环 控制技术	86
3.5 小结	87
参考文献	87

第4章 异步电机参数自整定

4.1 引言	92
4.2 电机参数离线辨识	93
4.2.1 电机旋转下的参数辨识	93
4.2.2 电机静止下的参数辨识	96
4.2.3 基于递推最小二乘法的参数 辨识	99
4.3 电机参数在线辨识	110
4.3.1 异步电机参数在线辨识数学 模型	110
4.3.2 带电压补偿的相电压 估算	112
4.3.3 仿真结果	115

4.3.4 实验结果	116	7.4.1 DTC 基本原理	200
4.4 小结	119	7.4.2 矢量选择和切换	202
参考文献	120	7.4.3 仿真结果	203
第 5 章 异步电机矢量控制	122	7.4.4 实验结果	206
5.1 矢量控制基本原理	122	7.5 离散空间矢量调制 DTC 及其无 速度传感器运行	208
5.2 电压解耦控制器	125	7.5.1 基本原理	208
5.3 矢量控制调节器	129	7.5.2 矢量切换	209
5.3.1 PI 调节器	129	7.5.3 仿真结果	210
5.3.2 滑模控制调节器	135	7.5.4 实验结果	212
5.3.3 模糊控制调节器	141	7.6 固定开关频率 SVM-DTC 及其无 速度传感器运行	215
5.3.4 实验结果与对比	145	7.6.1 基本原理	215
5.4 小结	150	7.6.2 基于 FLC 和 SMC 的新型 SVM-DTC	215
参考文献	150	7.6.3 仿真结果	216
第 6 章 无速度传感器技术	152	7.6.4 实验结果	218
6.1 开环反电动势校正法	152	7.7 间接转矩控制及其无速度传感器 运行	222
6.2 闭环速度自适应磁链观测器	159	7.7.1 基本原理	222
6.2.1 龙贝格观测器	160	7.7.2 仿真结果	223
6.2.2 滑模观测器	169	7.7.3 实验结果	226
6.2.3 扩展卡尔曼滤波观测器	174	7.8 无速度传感器高性能电机闭环 控制策略分析和比较	228
6.3 闭环观测器综合比较	181	7.8.1 原理分析和比较	228
6.3.1 三种观测器之间的联系和 区别	181	7.8.2 低速性能和动态性能实验 结果比较	230
6.3.2 三种观测器的性能比较	182	7.8.3 各种闭环控制总结	230
6.4 小结	183	7.9 小结	230
参考文献	184	参考文献	231
第 7 章 三电平高性能异步电机 无速度传感器控制	185	第 8 章 异步电机高性能变频器的 研制及应用	234
7.1 三电平逆变器——异步电机控制 综述	185	8.1 无速度传感器通用变频器 研制	234
7.2 基于观测器的无速度传感器矢量 控制	187	8.1.1 控制系统设计	234
7.2.1 基本原理	187	8.1.2 电机起动电流抑制	237
7.2.2 实验结果	188	8.1.3 死区补偿	237
7.3 DTC 技术综述	199	8.1.4 无速度传感器闭环运行	239
7.4 优化矢量表三电平 DTC 及其无 速度传感器运行	200		

第 1 章 异步电机控制概述

1.1 引言

进入 21 世纪,中国能源领域总量需求不断增大,能源问题已经成为 21 世纪制约经济社会发展的重要因素。我国能源生产和消费在世界上都居于前列,2010 年我国一次能源消费量为 32.5 亿吨标准煤,同比增长了 6%。中国已成为全球第一能源消费大国,伴随而来的是能源紧张,温室气体排放增加,环境污染严重。由于单位产值能耗太大,能源消费惊人,节能减排已经成为当前我国社会和经济发展的项极为紧迫的任务。采用变频调速技术,可以节约能源,提高效率,是我国经济由粗放型走向集约型的必由之路。国家有关部门深刻认识到变频调速对于节能的意义,在 2004 年由国家发改委颁布的《节能中长期规划》中,电机系统节能被列为十大重点节能工程之一。在 2007 年由科技部颁布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要》中,“工业电机及典型泵阀关键技术研究”又被列为“十一五”国家科技支撑项目。

电机是电能消耗的最大户,统计数据显示,中国每年电机新增容量达 1.5 亿千瓦,总容量超过 7 亿千瓦。目前中国电机年用电量超过 20000 亿千瓦时,约占全国用电量的 60% 和工业用电量的 80%。在电动机中,交流电动机占 90% 左右,应用最多的是三相交流异步电动机。交流电动机特别是笼型异步电动机,由于结构简单、制造方便、成本低廉,而且坚固耐用、运行可靠、惯量小、很少需要维护、可用于恶劣环境等优点,在工业公用工程、国防军事装备、交通运输、电力、煤炭、石化、塑胶、冶金、纺织化纤以及食品行业等各领域都获得了广泛的应用^[1]。其中,低压 380V 电动机数量最多,但单机容量小,只占电动机整个用量的一部分,而 1kV 以上的高压电动机由于单机容量大,是电动机用电的主要部分,通常用于重要工业场合。比如,大功率的传动机械、大功率风机和水泵在工业领域占有主要地位,它们通常采用 400kW ~ 40MW, 3 ~ 10kV 的大功率交流电机进行拖动,采用高压大容量变频器对其进行变频调速改造后,可以直接降低电厂的厂用电和发电损耗,增大上网电量,同时还能提高电厂设备的自动化程度和运行寿命。因此,大力发展高性能变频调速技术,推进节能减排,对于完成“十二五”期间单位 GDP 能耗下降目标,保障国家能源安全和减少环境污染意义重大^[2]。

交流异步电动机是一个多变量、强耦合、高阶的非线性系统,随着电力电子器件制造水平的提高、电动机控制理论的不完善和微机控制技术与大规模集成电路

的迅猛发展,交流调速理论不断完善并且正逐步取代传统的直流调速。目前比较实用的交流调速控制方法一般可以分为转速开环恒压频比控制、转速闭环转差频率控制、矢量控制和直接转矩控制(DTC)等几种方式^[3]。对于风机水泵等一般性能的节能调速,采用简单的恒压频比控制即可满足要求。实际中还存在大量的对转速精度和转矩响应都有一定要求的工艺性调速,如电力机车牵引、电动汽车、轧钢系统、船舶推进等场合。过去由于电力电子器件的制造水平和电机控制理论发展程度的限制,通常采用直流调速以实现高性能的闭环控制,但直流电动机存在电刷和换向器,需要经常维护,而且换向能力限制了直流电动机的容量和速度。矢量控制是交流异步电动机高性能调速场合应用最广泛的控制方法,又称为磁场定向控制。磁场定向控制可分为定子磁场定向、转子磁场定向和气隙磁场定向三种。其中,基于转子磁场定向的矢量控制应用最多,可以实现交流异步电动机的解耦控制,即磁链和转矩的独立控制,采用这种方法可以使异步电动机的变频调速动态性能与直流电动机相媲美。转子磁场定向矢量控制又分为直接转子磁场定向矢量控制和间接转子磁场定向矢量控制,在异步电动机直接矢量控制系统中,转子磁链观测是实现磁场准确定向的关键环节,直接影响到控制系统的性能^[4]。通常是通过检测电流、电压和转速等可以直接检测的量,通过磁链电压模型和磁链电流模型,或者采用状态观测器的方法来观测电动机的转子磁链,计算得到转子磁链的幅值和相位。磁链观测的准确与否取决于电压、电流信号和速度信号的检测精度以及电动机参数的准确程度,如果检测信号精度低,受干扰波动大,或者运行环境改变引起电动机参数变化,都将会影响到磁链观测的准确性。

要实现异步电动机的高性能调速控制,除了磁链观测外,还需要准确的转速信息,速度闭环是实现高性能调速的必要条件。一般都是通过安装速度编码器来获得转速信息,这种有速度传感器的矢量控制系统,响应快,精度高,性能好,可实现低速和零速平稳运行。但是速度编码器的引入增加了系统的成本,受检测干扰和硬件故障因素影响而降低了系统的可靠性。另外,还存在安装问题,受高温、粉尘、潮湿、空间等因素影响,有些场合不允许或不适宜安装速度编码器。因此,研究无速度传感器矢量控制技术具有实际意义,随着电力电子技术的发展,借助DSP通过电动机电流和电压信号来估算转速是可能的^[4],但是转速估计一般很复杂,另外转速估计十分依赖电动机自身参数。尽管目前许多国外品牌的变频器已经实现了无速度传感器矢量控制系统并投入了实际应用,但是由于信号的噪声干扰和电动机参数的不准确和变化,造成低速估计不准,在低速性能上还存在许多问题。因此,如何提高低速场合磁链观测、转速估算精度和稳定性,一直是个研究热点^[5],除了不断改进观测技术和估算方法外,电动机静止和运行时电动机参数的准确获取是准确观测转子磁链和速度进而实现高性能交流调速的前提。

因此,研究高性能无速度传感器矢量控制技术可以进一步增加自主高性能变频技术的积累,促进国内变频器产业快速发展。我国工业对变频器的需求量相当大,

但是市场上销售和企业使用的大都是国外品牌。我国变频调速技术起步较晚,目前国内品牌的变频器产品大都是采用标量控制,主要是应用在对控制性能不高的低端场合,采用真正矢量控制的国内品牌变频器相对较少,且其性能与国外品牌相比也还存在一定差距。国外品牌的变频器在我国的市场占有率达到 80% 以上,因此需要提高国产变频器的产品性能和质量,促进国内变频器企业快速发展,提高国内市场份额。开发高性能无速度传感器交流调速技术并尽快将其产品化具有重要意义。

对于冶金轧钢、矿井提升、机车牵引和船舶推进等国民经济重要场合,这些应用领域不仅需要高稳态转速精度、快速的转矩响应和较强的过载能力,而且通常需要较大的功率输出。随着新型电力电子器件的发展,如集成门极换流晶闸管(IGCT)和高压绝缘栅双极型晶体管(HV-IGBT),以及多电平拓扑的成熟,如三电平中点钳位结构,多电平高性能大功率变频调速在上述场合已经得到广泛应用,其中基于中点钳位的三电平高性能变频调速系统最为突出。由于三电平高压大容量变频器具有十分广阔的应用前景、巨大的市场需求,并且技术门槛高、开发难度大,目前已经成为电力电子研究和应用的热点^[6]。三电平结构具有所需器件少、结构简单、体积小、质量轻和能量可双向流动等优点^[7],非常适合用于高性能调速系统。目前国内研究三电平变频器的厂家并不多,与H桥串联结构相比,不够成熟,大部分局限于恒 V/f 比水平^[8]。而西方发达国家在三电平高压变频器上已经有了多年的积累,技术比较成熟,从开环到高性能闭环控制都有系列的产品并且不断推陈出新。典型代表是西门子的三电平矢量控制系统和ABB公司的三电平直接转矩控制系统,并且占据了国内大部分市场。出于技术保密等因素,很多关键技术都对外保密,无从查询。因此,研究基于三电平逆变器结构的高性能闭环控制算法,对于打破国外公司的垄断,提高国内自主研发水平,具有重要意义。

1.2 电力电子技术的发展

1.2.1 电力电子器件及其发展

电力电子器件是电力电子技术发展的物质基础。从 20 世纪末到 21 世纪初,电力电子器件有了很大的发展,特别是一些高耐压、大电流的全控型器件问世,为高压大容量变频器形成工业产品创造了良好的条件。电力电子器件按照触发信号来分可以分为电压控制型器件和电流控制型器件。电压控制型器件主要包括金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)和电子注入增强型栅极晶体管(IEGT),其特点是输入阻抗高、驱动电路简单、所需驱动功率小、开关频率高,电流控制型器件包括晶闸管(SCR)、门极可关断晶闸管(GTO)、集成门极换流晶闸管(IGCT)和功率晶体管(BJT),其特点是具有电导调制效应,通态压降低,但工作频率低,驱动电路较复杂,驱动功率较大。目前在实际中使用

的高压器件主要有 SCR、GTO、IGCT、IGBT 和 IEGT 等。此外，大功率的快速恢复二极管作为不可控开关器件也发挥了不可或缺的重要作用。

SCR 是半控型器件，它所能承受的电压和电流仍然是目前电力电子器件中最高的，但由于开关频率低，只能采用相控方式，对电网的谐波污染严重，随着大功率的 IGCT 和 IGBT 的出现，SCR 正逐步退出历史舞台。

GTO 是改进的 SCR，不仅可以控制开通，也可以控制关断。其最高容量是 10kV/6kA。GTO 被普遍应用在大功率机车牵引等场合，但其吸收电路复杂和驱动电路功率较大，限制了其应用。由 SCR 和 GTO 派生出来的 IGCT 由于其优异的性能，正在逐步取代 GTO，受到人们的更多关注。

IGCT 是将门极驱动电路和门极换流晶闸管集成于一个整体形成的器件，它不仅与 GTO 有相同的高阻断能力和低通态压降，而且有与 IGBT 相当的开关性能，兼有 IGBT 和 GTO 所长，是一种理想的兆瓦级开关器件。IGCT 具有如下特点^[2]：①缓冲层设计技术使 IGCT 的芯片厚度比同样耐压等级的 GTO 芯片厚度减少了 40%；②透明阳极技术可以快速释放器件的存储电荷，大大缩短了关断时间；③逆导技术较好地解决了 GCT 和二极阳极间的隔离问题；④硬驱动技术大大减少了门极电路上的杂散电感。基于以上新技术，IGCT 具有可靠的门极驱动、优异的关断特性和更小的通态及关断损耗，采用 IGCT 的大容量变频器结构更简单，效率更高。

IGBT 是功率晶体管和 MOSFET 的复合器件，既有 GTR 的导通压降低、通流密度大的优点，又有 MOSFET 的开关频率高、开关损耗低和控制方便等优点，因此成为中小功率等级的主导器件。IGBT 发展很快，为了适应更高功率的应用场合，其功率等级一再提高，目前已有 6.5kV 的 IGBT 研制成功^[9]。

电子注入增强型栅极晶体管（IEGT）是在 IGBT 基础上发展起来的一种新型复合器件，具有低损耗、高速动作、高耐压、有源栅驱动智能化等特点，以及采用沟槽结构和多芯片并联而自均流的特性，通过模块封装方式还可提供众多派生产品，在大、中容量变换器应用中被寄予厚望。目前 4.5kV/6000A 的 IEGT 已经研制成功^[10]。

随着电力电子器件的发展，碳化硅（SiC）器件正越来越引起人们的注意。碳化硅材料和其他半导体材料相比，具有如下优点：高禁带宽度、高饱和电子漂移速度和击穿强度、低介电常数和高的热导率。上述这些特性决定了碳化硅器件在高温、高频和高功率等场合是理想的电力电子器件。但由于碳化硅材料的制约，在 SiC 材料和功率器件的机理、理论和制造工艺等方面还存在大量问题需要解决，碳化硅器件的普遍应用还需假以时日。

总之，电力电子器件的飞速发展，为高性能变频器的开发提供了坚实的物质基础，可以预见以后会有性能更好的电力电子器件出现。

1.2.2 电动机控制用功率变换器

两电平三相变换器是最为成熟的功率变换器，在中小功率等级的电动机控制中得到了广泛应用。各大半导体厂商几乎都有电压和功率等级不同的三相两电平变换器产品，极大地方便了兩电平变频器的生产和制作。为了进一步减少体积，降低成本和提高可靠性能，很多公司将控制和功率器件集成在同一块芯片上，形成了功率集成电路（PIC）。像专用功率器件模块和变频调速装置逆变回路部分用到的智能功率模块（IPM），把功率器件、驱动、控制、保护电路都集成在一起，给应用带来了很大便利。

虽然传统的两电平变换器结构日趋成熟，已得到广泛应用，但受制于器件的耐压和容量限制，用于大功率场合存在一些问题。为了获得高压大功率，两电平拓扑不得不采用器件串联或者并联技术，从而带来动静态均压和均流等问题。另外，还有过高的 dv/dt 和共模电压，降低了系统的可靠性。20 世纪 80 年代以后发展起来的多电平变换器，与传统两电平变换器相比，可以降低器件的承压，易于实现高压大容量，而且输出电压有更多的电平数，谐波含量小，因此在高压领域得到了迅速的发展。

三电平逆变器主电路及其方案最早由德国学者 Holtz 于 1977 年提出，其中每相桥臂带一对开关管，以辅助中点钳位。后来，1980 年日本学者 A. Nabae 在当年的 IAS 年会上对此进一步改进^[11]，将这些辅助开关变成一对二极管，分别与上下桥臂串联的主管中点相连，以辅助中点钳位，从而构成二极管中点钳位型（Neutral Point Clamped, NPC）三电平变换器。与前者相比，该电路更易于控制，且主管关断时仅承受直流母线一半的电压，因此更为实用。1983 年，Bhagwat 和 Stefanovic 进一步将这种电路结构由三电平推广到多电平，从而奠定了 NPC 结构的多电平模式^[12]，为高压大容量变换器提供了新思路。多电平变换器作为一种新型的高压大容量功率变换器，从电路拓扑结构入手，在得到高质量的输出波形的同时，克服了两电平变换器需要输出变压器和动态均压电路的诸多缺点，具有以下主要优点：① 更适合高压大容量场合；② 电平数越高，输出的电压谐波含量越低；③ 器件开关频率低，开关损耗小，效率得到提高；④ 器件应力小，无须动态均压。因此，自 20 世纪 80 年代以来被广泛应用于高压交流调速和大功率静止无功补偿等场合^[13,14]，目前已经成为电力电子的一个重要研究领域^[15]。

多电平逆变器的思想提出至今，出现了许多电路拓扑，现在一般认为目前实际应用中比较有代表性的多电平变换器有三种主要拓扑结构：二极管中点钳位型、飞跨电容型和输出串联型。

1. 二极管中点钳位型拓扑

图 1-1a 给出了中点钳位型多电平逆变器的拓扑结构图。这种结构的特点是采用多个二极管对相应开关元件进行钳位，输出相应 M 电平的相电压。二极管钳位