



北京市高等教育精品教材立项项目



交流调速控制系统

周元钧 编著

*Jiao Liu Tiao Su
Kong Zhi Xi Tong*



机械工业出版社
China Machine Press

013033578

TM340.12
07



北京市高等教育精品教材立项项目

交流调速控制系统

周元钧 编著

Jiao Liu Tiao Su
Kong Zhi Xi Tong



北航

C1640336



机械工业出版社
China Machine Press

TM340.12

07

013033212

图书在版编目 (CIP) 数据

交流调速控制系统 / 周元钧编著. —北京: 机械工业出版社, 2013.2

(北京市高等教育精品教材立项项目)

ISBN 978-7-111-40951-9

I. 交… II. 周… III. 交流电机—调速控制器—控制系统—高等学校—教材 IV. TM340.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 309253 号

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

本书的编写考虑了交流调速技术在自动化领域应用的特点, 重点阐述了变频交流调速系统的原理、控制方法和系统结构, 内容包括了无刷直流电动机、同步电动机、异步电动机和开关磁阻电动机构成的交流调速系统, 其中特别加重了近年来广泛应用的无刷直流电动机的内容。该书的特点是加强了变频交流调速的基础, 针对的是采用现代电力电子和微处理器的控制方法, 还介绍了部分航空航天领域的应用技术和实例。

本书可作为电气自动化专业研究生课程的教材, 同时可供从事相关领域研究的科技人员参考。

机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 刘立卿

北京市荣盛彩色印刷有限公司印刷

2013 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

185mm×260mm·17.5 印张

标准书号: ISBN 978-7-111-40951-9

定 价: 45.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 68379649 68995259

读者信箱: hzsj@hzbook.com

前言

近年来,中小功率的交流传动系统越来越多地应用于自动化、航空航天、交通、家用电器等领域,交流调速的知识被众多理工高校列入研究生教学内容。本书被列入北京市高等教育精品教材建设立项项目,主要是作为电气自动化专业研究生的教材,同时供从事相关领域教学和科研的科技人员参考。

国内“交流调速”领域的教材已经很多,但本书的编写考虑到近年来交流传动新技术的发展,及其在自动化领域应用的特点,内容只是针对中小型交流电动机构成的控制系统。本教材在内容上与同类教材比较有以下特点:

- 鉴于近年来永磁无刷直流电机、永磁同步电机在自动化设备、航空航天、机器人、医疗、家用电器等领域的广泛应用,本书着重讨论了这两种调速系统,并且加强了电机性能分析、运行控制等方面的内容。
- 本书针对的是中小功率电机,不再讨论晶闸管驱动的交流调速系统,而是主要讨论基于功率开关器件的 SPWM 控制技术、SVPWM 控制技术是目前一些主流的交流传动驱动技术。
- 微处理器技术的发展是影响交流传动系统发展的重要因素,目前电机控制专用微处理器、集成电路发展迅猛,大部分交流传动系统都实现了数字化,因此本书去掉了模拟电路控制技术部分,并且完全按照微处理器控制来讨论系统结构。
- 交流传动系统越来越多地应用于航空航天领域,这些系统的特点是电机转速高,强调高效率、高可靠性,因此本书特别将余度结构的交流传动系统、开关磁阻电动机的控制系统及其应用列入其中。

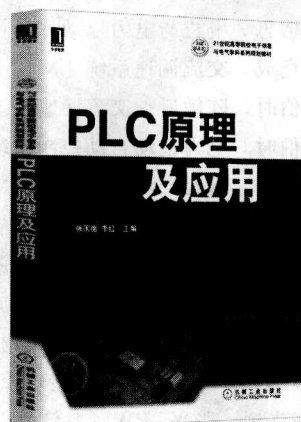
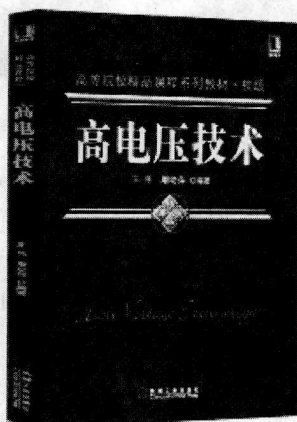
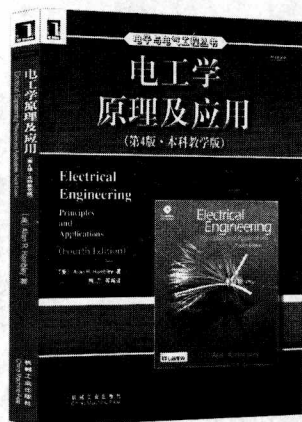
本书在内容结构上以直流调速系统为基础,章节安排时采用了由浅入深、循序渐进的原则,将与直流调速系统最接近的无刷直流电动机调速系统放在前面,将异步电动机调速系统放在后面,并且按照交流电动机在旋转坐标系的等效变换原理,将同步电动机矢量控制内容放在异步电动机矢量控制内容的前面。

本教材从构思开始就得到朱耀忠教授的大力帮助,在整个教材编写的过程中,朱耀忠教授也不断地提出宝贵的建议,在此表示衷心感谢。

作者

2012 年 12 月

推荐阅读



电工学原理及应用

作者: Allan R. Hambley ISBN: 978-7-111-29336-1 定价: 59.00元

本书基于该书第4版进行改编,保留其中的基本内容,压缩或删除了一些高级内容。第4版还为教师和学生提供了功能强大的网络信息资源套装,详情请登录培生教育的工程实验室网站<http://www.myengineeringlab.com>。本书适用于化工、生物、土木工程等非电专业学生的“电工学”课程,也可以作为电气工程、计算机、自动化等专业学生的专业导论课程的参考教材。

高电压技术

作者: 王伟 屠幼萍 ISBN: 978-7-111-33081-3 定价: 28.00元

本书着重介绍高电压技术最基本的概念、理论和实用方法,主要内容包括气体放电的基本物理过程,气体介质的电气强度,高电压绝缘中气体、固体、液体和组合绝缘的电气特性,电气设备绝缘预防性试验,电气设备绝缘在线监测,输电线路和绕组中的波过程,雷电及防雷保护装置,输电线路的防雷保护,发电厂和变电站的防雷保护,电力系统内部过电压以及电力系统的绝缘配合原则等。

PLC原理及应用

作者: 张国德 李红 ISBN: 978-7-111-29221-0 定价: 29.00元

本书以在工业控制领域中应用广泛的S7-300系列PLC为样本,面向高校学生及工程技术人员,本着简化理论、突出实践的指导思想,精简那些对实际工程设计操作使用不多的基础理论,加强工程实践环节。全书辅以多个实例,重点突出,语言简练。



北航

C1640336

目 录

前言

第1章 引言 1

1.1 交流调速系统的应用 1

1.1.1 交流调速系统在工业上的应用 1

1.1.2 交流调速在航空航天领域的应用 2

1.2 交流调速技术的发展 2

1.2.1 功率变换技术的发展 3

1.2.2 功率电子器件的发展 4

1.2.3 数字控制器件的发展 5

1.3 本书的结构与内容 7

习题 8

第2章 交流调速方法与调速特性 9

2.1 交流电动机的调速原理 9

2.1.1 交流电动机的同步旋转磁场 9

2.1.2 同步电动机的调速原理 11

2.1.3 异步电动机的调速原理 11

2.1.4 开关磁阻电动机的调速原理 13

2.2 交流电动机的调速方法与调速特性 13

2.2.1 交流电动机的变频调速特性 13

2.2.2 异步电动机的变极调速方法与特性 15

2.2.3 异步电动机的变转差调速方法与特性 18

2.2.4 小结 21

2.3 交流电动机的等效变换 21

2.3.1 直流电动机的控制原理 21

2.3.2 同步电动机的等效变换 22

2.3.3 异步电动机的等效变换 23

2.3.4 小结 25

2.4 航空航天交流调速系统的控制问题 26

2.4.1 航空航天交流调速系统的特点 26

2.4.2 航空伺服控制系统 27

2.4.3 冗余度结构和容错控制 27

2.4.4 无位置传感器系统的应用 28

本章小结 29

习题 29

第3章 静止变频器控制技术 30

3.1 静止变频器的类型 30

3.1.1 传统静止变频器类型 30

3.1.2 新型静止变频器类型 33

3.1.3 电压源和电流源变频器 35

3.2 方波逆变器 36

3.2.1 零式方波逆变器 36

3.2.2 三相桥式方波逆变器 37

3.2.3 方波逆变器的谐波分析 41

3.3 正弦脉宽调制变频器 43

3.3.1 正弦脉宽调制变频器的工作原理 43

3.3.2 SPWM信号的采样方法 47

3.3.3 SPWM的电压与频率控制 48

3.3.4 准正弦波脉宽调制法 50

3.3.5 正弦电流跟踪型脉宽调制方法 51

3.4 空间矢量脉宽调制变频器 53

3.4.1 SVPWM 控制的基本原理	53	4.4.3 双重绕组无刷直流电动机的机械特性	104
3.4.2 基于矢量相位的 SVPWM 控制方法	57	本章小结	105
3.4.3 减小谐波影响的 SVPWM 控制方法	59	习题	106
3.5 脉宽调制变频器输出的谐波分析	63	第 5 章 无刷直流电动机调速系统	107
3.5.1 采用规则采样法对输出波形的影响分析	63	5.1 无刷直流电动机的运行控制	107
3.5.2 桥臂器件开关死区对输出波形的影响分析	65	5.1.1 调速和起动控制	107
本章小结	68	5.1.2 制动运行的控制	109
习题	69	5.1.3 前端电压斩波控制的电动机四象限运行	112
第 4 章 无刷直流电动机与运行特性	70	5.1.4 前端电流滞环控制的电动机四象限运行	115
4.1 无刷直流电动机的原理	70	5.2 无刷直流电动机闭环调速系统	116
4.1.1 结构特点和工作原理	70	5.2.1 PWM 控制的单闭环调速系统	116
4.1.2 电机的基本模型	72	5.2.2 PWM 控制的双闭环调速系统	119
4.1.3 电机的基本特性	74	5.2.3 前端电压斩波控制的调速系统	121
4.2 无刷直流电动机的换相方法	75	5.2.4 前端电流滞环控制的调速系统	123
4.2.1 三相半桥 Y 形结构电机的换相控制	75	5.3 无刷直流电动机转子位置测量技术	125
4.2.2 三相桥 Y 形结构电机的换相控制	76	5.3.1 位置传感器的分辨率	125
4.2.3 三相桥 Δ 形结构电机的换相控制	81	5.3.2 转子位置传感器类型	127
4.2.4 不同结构电机的特性比较	86	5.3.3 无位置传感器的换相控制	129
4.3 无刷直流电动机脉动转矩分析	87	5.4 双通道的无刷直流电动机调速系统	132
4.3.1 反电势波形对脉动转矩的影响	87	5.4.1 双通道调速系统结构	132
4.3.2 换相角误差对脉动转矩的影响	93	5.4.2 双通道调速系统的均衡控制	133
4.3.3 电子换相引起的脉动转矩	96	5.4.3 双通道双闭环系统的动态模型	136
4.4 双重绕组无刷直流电动机及其控制	101	5.4.4 系统的容错性能	137
4.4.1 双重绕组无刷直流电动机的结构特点	101	5.5 航空多余度机电作动器	140
4.4.2 双重绕组无刷直流电动机的数学模型	103	5.5.1 双余度结构的机电作动器	140
		5.5.2 四余度结构的机电作动器	143
		5.5.3 四余度机电作动器的容错特性与可靠性	145

本章小结	147	7.2 同步电动机的矢量控制	183
习题	148	7.2.1 磁链、磁动势的空间矢量 关系	183
第6章 异步电动机变频调速系统 ...	149	7.2.2 转子磁链定向的矢量控制 ...	184
6.1 异步电动机变频调速稳态特性 ...	149	7.2.3 气隙磁链定向的矢量控制 ...	187
6.1.1 自然机械特性	149	7.2.4 定子磁链定向的矢量控制 ...	189
6.1.2 变频调速的基本控制方式 ...	150	7.2.5 同步电动机的转子位置 测量	191
6.1.3 电压频率协调控制的机械 特性	151	7.3 永磁同步电动机矢量控制调速 系统	194
6.2 变频调速的运行控制	154	7.3.1 调速基本原理	194
6.2.1 电压频率协调控制的低速 电压补偿	154	7.3.2 单闭环调速系统	195
6.2.2 变频调速的起动控制	157	7.3.3 双闭环调速系统	197
6.2.3 变频调速的制动控制	159	7.3.4 电流滞环控制的调速系统 ...	201
6.3 转速开环的变频调速系统	161	7.3.5 航空双通道交流伺服控制 系统	201
6.3.1 电压单闭环控制的调速 系统	161	7.4 电磁式同步电动机矢量控制调速 系统	204
6.3.2 升速与降速控制方法	162	7.4.1 磁链开环的矢量控制调速 系统	204
6.3.3 系统动态数学模型	166	7.4.2 磁链闭环的矢量控制调速 系统	206
6.4 转速闭环的转差角速度控制的 变频调速系统	168	7.4.3 同步电动机的功率因数 控制	208
6.4.1 转差角速度控制的基本 原理	168	本章小结	210
6.4.2 转差角速度控制的变频 调速系统	170	习题	211
6.4.3 系统动态结构图	171	第8章 异步电动机矢量控制调速 系统	212
6.4.4 转差角速度控制调速系统的 特点	171	8.1 异步电动机的动态数学模型	212
本章小结	172	8.1.1 异步电动机基本电磁关系 ...	213
习题	173	8.1.2 异步电动机在同步旋转 坐标系上的数学模型	216
第7章 同步电动机矢量控制调速 系统	174	8.1.3 在其他坐标系上的数学 模型	219
7.1 同步电动机的数学模型	174	8.2 异步电动机的矢量控制方法	221
7.1.1 同步电动机的基本电磁 关系	174	8.2.1 转子磁链定向的数学模型 ...	221
7.1.2 交流绕组的坐标变换	177	8.2.2 异步电动机矢量控制方法 ...	222
7.1.3 同步电动机 d 、 q 、 o 坐标系 的数学模型	181		

8.2.3 异步电动机转子磁链模型 ...	224	9.2.1 开关磁阻电动机的电流 波形	247
8.3 异步电动机转子磁链定向控制的 调速系统	226	9.2.2 不考虑饱和效应的 SR 电动机 的转矩特性	249
8.3.1 磁链开环的转差型矢量控制 调速系统	226	9.2.3 考虑饱和效应的 SR 电动机的 转矩特性	252
8.3.2 磁链闭环的电压型矢量控制 调速系统	228	9.3 SR 电动机的运行控制	255
8.3.3 磁链闭环的电流滞环矢量 控制调速系统	231	9.3.1 SR 电动机的控制方法	256
8.4 异步电动机直接转矩控制的调速 系统	233	9.3.2 SR 电动机的调速控制	258
8.4.1 直接转矩控制系统的原理 ...	233	9.3.3 SR 电动机的起动与制动 控制	260
8.4.2 直接转矩控制系统	235	9.4 SR 电动机转速闭环控制的调速 系统	262
8.4.3 直接转矩控制系统的特性 分析	238	9.4.1 SR 电动机线性化动态 模型	262
本章小结	239	9.4.2 单闭环调速系统	264
习题	239	9.4.3 双闭环调速系统	266
第 9 章 开关磁阻电动机调速系统 ...	240	9.5 开关磁阻电机在航空中的应用 ...	268
9.1 开关磁阻电动机的结构和工作 原理	240	9.5.1 航空开关磁阻起动/发电机 系统 (SR-S/G 系统)	268
9.1.1 开关磁阻电动机的结构 ...	240	9.5.2 大功率机电作动器	270
9.1.2 常用的功率控制电路	243	本章小结	270
9.1.3 开关磁阻电动机的基本 电磁关系	244	习题	270
9.2 SR 电动机的电流和转矩特性 ...	247	参考文献	271

第 1 章

引 言

1.1 交流调速系统的应用

直流调速系统以其控制简单、调速性能好、变流装置结构简单等特点,在电力传动系统中长期占统治地位。在不具备变频调速条件的时代,交流电动机由于其调速特性差而大多使用在不变速的传动领域,后来虽然有多种交流调速方案问世,并已在某些领域获得一些实际应用,但其性能却始终无法与直流调速系统相匹敌。直到 20 世纪 70 年代末交流调速才取得突破,一直被认为是天经地义的交直流调速的分工格局终于被打破。

1.1.1 交流调速系统在工业上的应用

近年来交流调速获得广泛应用,大有逐步取代直流调速系统的趋势。导致这种变化的原因主要有下述三个方面:

1) 能够实现节能调速 在过去大量的所谓不变速交流传动中,风机、水泵等机械总容量几乎占工业电气传动总容量的一半,其中有不少场合并不是不需要调速,而是因为交流电机本身调速不方便,不得不依赖挡板和阀门来调节送风和供水的流量,或者采用所谓“呼呼”控制方法,使交流电机反复地起动和制动。这样的系统效率很低,导致许多电能被浪费。该情况如果换成交流电机调速系统,每台风机、水泵平均可节能约 20%。

2) 大容量、高转速电驱动的需要 许多需要调速性能的生产机械,过去多用直流调速,直流电机换向器的换向能力限制了它的容量和转速,其极限容量与转速的乘积约为 $10^6 \text{ kW} \cdot \text{r/min}$,超过这一数值时,直流电机的设计和制造就非常困难了。交流电机则不受这个限制,因此特大容量的传动(如厚板轧机、矿井卷扬机等)和极高转速的传动(如高速磨头、离心机等),当采用电驱动时,都以采用交流调速为宜。

3) 高可靠性和长寿命的需要 直流电机的电刷和换向器的结构,导致电机的故障率很高,使用寿命短,维护工作量大。而异步电动机结构简单,故障率低,工作寿命长,适用于恶劣的环境。在 20 世纪 70 年代初发明了交流电机矢量控制技术(或称磁场定向控制技术)后,交流调速可以获得和直流调速相仿的动态性能,从而使高操纵性的伺服系统中也采用交

流驱动,取代了直流驱动。

交流调速系统的广泛应用,依赖于交流调速控制技术的发展,其中最核心的是电力电子技术的发展,其次微处理器技术的进步也起到了决定性的作用。因此可以说,交流调速技术的发展依赖于电子技术的发展,或者说电子技术的发展贯穿在整个交流调速发展过程中。

1.1.2 交流调速在航空航天领域的应用

航空航天领域是现代各种高科技技术应用最活跃的领域之一,电力传动技术的发展也引起航空、航天领域若干技术的更新,同时航空航天领域电力传动的需求,也促使某些交流调速技术的发展。

20世纪80年代以前,飞机运动控制系统大部分采用液压、气压或者机械驱动,只有小功率(分马力)运动系统采用电力传动。这些电力传动的调速控制或者采用直流电动机来实现,或者采用电磁离合器、磁粉离合器等功耗型元件来实现。而交流电动机仅应用于不需要调速的驱动系统,例如各种泵、风扇等。

电力传动具有效率高、可靠性高、电能控制方便等优点,在飞机上采用电力传动取代液压、气压或者机械传动一直是人们的愿望。由于在高空寒冷、空气稀薄等特殊环境下直流电机基本不能使用,所以一直到交流调速技术发展起来后,人们的这种愿望才变为现实,于是关于航空电力传动技术的研究大量开展起来。但是由于飞机高可靠性和安全性的特殊要求,任何一种新技术只有相当成熟后才能正式使用,交流调速也是如此,因此目前常规飞机的大部分运动控制系统仍然采用液压、气压传动。

从20世纪80年代开始,在航空领域提出了“全电飞机”(All-Electric Aircraft)和“多电飞机”(More-Electric Aircraft)的概念,大功率(几十千瓦)的交流调速系统开始被研究并应用于航空领域,其目标是逐渐取代目前飞机上的液压传动、气压传动,其中最具代表性的为飞行控制系统的电力作动器(Electric Actuator),将原液压源驱动飞机舵面改为电力驱动。电力作动器要求电机能够快速操纵以及高可靠性,目前大部分采用的是无刷直流电动机,也有使用永磁同步电动机、开关磁阻电动机驱动的。

交流调速技术的发展,同样也会影响到航天领域,该技术越来越多地应用到航天器各个运动系统中。例如20世纪80年代研究的一种四套绕组的永磁无刷直流电动机,采用四套电子控制器构成具有很强容错性能的四通道控制系统,应用于航天飞机的副翼作动器上。近年还在研究一种应用于低轨道航天器的飞轮储能系统,其目标是取代蓄电池,该储能系统采用永磁同步电动机和磁悬浮轴承,由于磁悬浮轴承无机械磨损而使寿命大大增加。

1.2 交流调速技术的发展

交流调速比较好的方法是通过控制电动机的电源来改变电动机的工作状态,其中变频调速方法具有调速性能好、效率高等优点,同时适用于同步电动机和异步电动机。但是变频调速需要控制施加在电动机上的交流电源的频率和电压(电流),而完成这种控制必须有能够改变电源频率和电压(电流)的功率变换器。另一方面,由于功率变换器的控制、电动机的运行控制和调速系统的控制等需要,交流调速系统对处理器的要求也不断提高。

1.2.1 功率变换技术的发展

交流电动机诞生于19世纪80年代,而变频调速技术发展到了普及实用阶段却是20世纪80年代,其过程整整经历了一个世纪。在交流调速技术的发展中,电能变换技术是其主要因素,因此它的发展伴随着电力电子技术的发展。

1. 旋转式变流装置的电能变换

在没有电力电子器件的时代,人们曾采用过由电动机和发电机构成的一种旋转式电能变换装置(又称为变流装置),完成不同类型的电能变换。例如采用直流电动机拖动交流发电机的电能变换装置,能够通过控制直流电动机的转速来控制交流发电机的转速,进而控制发电机输出电压和频率,获得电压、频率可控的交流电源。

该类电能变换装置大部分在实验室使用,以完成一些交流调速的原理和特性的研究。这类装置因结构复杂、效率低,很难大量应用于工业生产。

在此期间,交流调速技术的应用主要采用异步电动机改变滑差率 s 的调速方法,即在定子、转子绕组上串入电阻或者电抗改变电机输出转速,绕线型异步电动机成为交流调速的主体,笼型异步电动机只能完成变极调速。这样的调速系统采用电器控制技术,即继电器、接触器为系统中的主要控制器件。变转差调速一般都为功耗型,即为了降低电机转速,将一部分电磁功率消耗在串入的电阻上,效率很低,调速范围有限,只能实现有级调速。

2. 半控器件实现的电能变换

在半控的功率电子器件,即晶闸管出现以后,电能变换技术产生了很大的突破。采用交-直-交间接变频装置,或者交-交直接变换器,能够将电压和频率恒定的供电电源变换为电压和频率可控的交流电源,实现了交流电机的变频调速。

晶闸管出现之后,不仅能够实现变频调速,异步电动机变转差调速也得到很大的改进,能够实现闭环控制的调压调速、串级调速等。其中绕线型异步电动机串级调速实现了能量的回馈,将转差功率回馈到电网,使调速效率大大提高,能够获得比较宽的调速范围,能够平滑调速。有人将晶闸管控制的交流调速称为近代交流调速。

但是晶闸管整流电路对于供电网络有功率因数低、电流谐波大等问题,并且由于晶闸管开关频率比较低,变换后交流电源的谐波比较大,控制电路比较复杂等因素,影响了使用的广泛性。目前中小功率的交流调速系统使用很少,只在特大功率的交流调速系统中仍然在使用。

3. 全控器件实现的电能变换

有人将功率开关器件称为现代电力电子器件,将采用现代电力电子器件(即功率开关器件)实现电能变换的交流调速系统称为现代交流调速系统。

功率开关器件能够采用高频斩波的脉宽调制(PWM)技术,通过用一连串宽窄不等的脉冲信号控制功率开关器件的导通/关断,产生电压和频率可控的正弦交流电源。交流电机的变频调速,使调速性能达到与直流调速系统比美的程度,逐渐形成取而代之的趋势。

功率开关通过PWM实现的逆变器,产生的电能品质好,控制性能好,效率高。在先进的电能变换技术的支持下,在变频调速的原理下通过坐标变换进行矢量控制,实现了系统高动态性能的控制。这不仅使异步电动机能够应用于高控制性能的伺服系统,而且使同步电动机的应用发生了飞跃。由于同步电动机在诸多性能上优于异步电动机,所以被大量地使用于

航空、航天、机械等各领域。

1.2.2 功率电子器件的发展

功率开关器件实现的电能变换有优良的性能,但是这种变换技术的广泛应用依赖于功率电子器件的发展。功率电子器件的发展趋势有以下几个方面。

1. 大功率化

一直以来,功率开关器件由于功率的限制,导致了大功率、特大功率的电力传动系统还不能采用 PWM 方法进行控制。但是近年来,人们在增大功率开关器件的控制功率方面已经取得了显著的成果。

(1) 非穿通型 (NPT) IGBT 管

进入 21 世纪以来,65kV、1~3kA 的 IGBT 已经商业化。它们都是采用了 NPT 结构,实现单串多并,也就是说每个管芯的耐压都要达到 65kV,而每个芯片的电流都在 60~80A 的水平,然后把几十个、上百个芯片并联起来,自动均流,以满足电力机车、大型交流电力传动等大功率应用的要求。

(2) GTO 向 IGCT 发展

功率晶闸管以其耐压高、电流大而占有重要的市场位置。GTO 是在晶闸管基础上发展而来的,它将一个半控型器件改进为可以用负门极电流关断的全控型器件。但是,由于用极大的窄脉冲负门极电流关断存在很多不可靠因素,所以在 20 世纪 80 年代,有人提出把 MOS 机制引入 GTO 实现开和关的模式,提出了 MOS 控制关断的晶闸管 (MCT) 的新器件设想。经过多年的实践,其技术难度最终断送了这种器件的新生。于是,有人把 MCT 用内部 MOS 管开关的模式转换成把 MOS 管放到 GTO 的外面,实现辅助开通和关断,这就是 IGCT 的由来。IGCT 利用一组置于阴极侧的 MOS 管和另一组置于门极侧的 MOS 管配合主 GTO 的开通和关断,提高了 IGCT 的运行可靠性。

2. 低损耗与高频化

电力电子设备的效率一直是人们关注的性能之一,高的功率损耗不仅浪费能源,还必须解决散热问题,进而在系统结构、环境条件、体积和重量等方面带来一系列的问题。近年来,人们在降低功率开关器件的损耗方面也取得了重大的进步。

(1) 冷态 MOS 器件 (Cool MOS)

21 世纪以来,冷态 MOS 器件的设计和制造工艺取得了重大进步,该新结构产品的通态电阻仅为常规结构的 MOSFET 的 1/10 左右,它的工作频率可达几百 kHz 甚至更高,阻断电压可达 1200V,而通态压降和双极型器件相当。这样,MOSFET 管的最佳工作电压从 300V 以下扩展到 1200V 左右,满足了常压工频运行的基本需求。

另一方面,为适应低压直流电源供电的场所,例如汽车、计算机和航空低压电源等,开发的开关器件功率 MOSFET 通态电阻达到 10mΩ 乃至 1mΩ 以下,通态电流达到 100A。该类产品的已经在汽车、计算机等设备中广泛使用。

(2) 穿通型 (PT) IGBT 管

用 Cool MOS 结构替代常规的 MOSFET 管,其优点不仅在于通态电阻减小为 1/10,还在于反向恢复过程几乎消失。但是也有人认为,用 NPT 型 IGBT 管来替代常规的 MOSFET 管,电流密度也可以成倍地提高,成本可能更低。在此基础上,已经开发出可以在硬开关条件下

工作到 150kHz、在软开关条件下可以工作到 300kHz 的 IGBT 管。这样有可能在功率开关电源中替代 MOSFET 管,得到成本更低的设计和装置。当然,这种方案中仍然存在着反向恢复过程,线路设计者要考虑这个因素。

3. 功率电子器件的集成化

电力电子器件的集成化不仅能够方便用户使用,而且还能够提高器件的可靠性,因此器件集成化是电力电子器件发展的另一趋势。总的来说,电力电子装置与系统的集成可分为 3 个不同的层次。

(1) 单片集成

将电力电子电路中的功率器件、驱动、控制和保护电路都采用半导体集成电路的加工方法制作在同一硅片上,体现了 SOC (System on Chip, 单片系统) 的概念。这种集成方式集成度最高,适合大批量、自动化制造,可以非常有效地降低成本,减小体积和重量;但面临着高压、大电流的主电路元件和其他低压、小电流电路元件的制造工艺差别较大,以及高压隔离和传热的问题。故单片集成难度很大,目前仅在小功率范围有所应用,如 Top Switch 等。随着新型半导体材料和加工工艺的发展,这项技术将来必然向较大的功率等级发展。

(2) 混合集成

采用封装的技术手段,将分别包含功率器件、驱动、保护和控制电路的多个硅片封入同一模块中,形成具有部分或完整功能的、相对独立的单元。这种集成方法可以较好地解决不同工艺的电路间的组合与高电压隔离等问题,具有较高的集成度,也可以比较有效地减小体积和重量,但目前还存在分布参数、电磁兼容、传热等具有较高难度的技术问题,并且尚不能有效地降低成本和达到较高的可靠性。这项技术目前仍以中等功率应用为主,并正在向大功率发展。混合集成的典型例子是 IPM。在某种意义上,混合集成是在集成度与技术难度之间,根据当前的技术水平所采取的一种折中方案,具有较强的现实意义,是目前电力电子集成技术的主流方式。

(3) 系统集成

即系统级的集成,这是目前工程技术领域普遍采用的集成方案,其含义是将已有的实体经过有机的组合及拼装形成一个完整的系统。在电力电子技术领域,系统集成一般指将多个电路或装置有机地组合成具有完整功能的电力电子系统,如通信电源系统等。系统集成是功能的集成,集成度和技术难度较低,容易实现,但与独立的装置和电路相比,由于集成度低,体积和重量都无法显著降低,而且其构成仍以分立的元器件为主,设计、制造都较复杂,不能明显地体现集成的优势。目前,系统集成技术多用于功率很大、结构和功能复杂的系统,比较典型的为一体化电机系统。

1.2.3 数字控制器件的发展

在现代交流调速系统中,无论是实现整流器、逆变器的控制,还是实现电机的运行控制,都不得不依赖于微处理器,实现数字控制。在交流调速技术的发展中,相应的数字控制器件的发展占有重要的地位,它经历了集成电路、单片机和数字信号处理器等若干阶段。

1. 集成电路实现的数字控制器

为了控制功率开关器件进行电能变换,首先研制出相应的集成电路,德国西门子公司在

1986 年推出的三相可编程脉宽调制器 SEL4520 是其中之一, 其特点为:

1) 在微机的控制下能够产生驱动三相逆变器的 SPWM 三相六路信号。输出正弦波的范围可达 $0 \sim 2600\text{Hz}$, 开关频率可达 20kHz 。但 PWM 信号产生时采用的是单沿调制技术, 在高频时波形对称性差。

2) SEL4520 可以通过编程设置相序改变来控制电动机的转向, 同时可在三对输出中选择不同占空比实现直流制动, 控制电机四象限运行。但其电压和频率的控制能力, 只能实现电压频率协调控制的转速开环的变频交流调速系统。

3) SEL4520 要求与 8 位微处理器组合使用, 例如 MCS-51 系列单片机, 它能够以总线方式与单片机通信。

该类集成电路为功率开关器件进行 SPWM 方式的电能变换提供了方便, 但当需要实现电流、电压或者转速反馈时, 还需要增加 A/D 变换器或者其他接口电路。另一方面, 8 位的集成电路, 产生的信号的分辨率比较低, 使其在交流调速系统中的性能受到限制。

2. 单片机实现的数字控制器

电机控制功能的单片机将微处理器与三相波形发生器电路集成到一个芯片内, 使用户控制器设计时更为简便。Intel 公司生产的 8XC196MC/MD 是最早出现的能够实现三相波形发生的单片机, 它有以下特点:

1) 将具有运算功能的微处理器与三相 PWM 波形发生器集成在一起, 在微处理器完成控制律的计算后直接产生三相交流控制信号, 控制电机电源的电压和频率, 并且该控制信号可以直接驱动功率开关器件。

2) 单片机内部集成有 A/D 变换器, 可以直接将模拟量表现的反馈数据采样到处理器内, 实现闭环控制。对于多个模拟量需要输入时, 需要在 A/D 输入端外增加多路转接开关。

3) 该单片机不仅有运算的能力, 而且还有两个定时器与一个事件处理器阵列, 可以容易地定义控制器的采样周期, 以及对系统的突发事件进行处理, 实现功率电路的保护功能。

单片机的出现为交流调速的控制提供了更大的方便, 但是早期的单片机虽然集成了微处理器和三相控制信号发生器, 但运算速度和运算精度还比较低, 常常需要采用汇编语言编程。

3. 数字信号处理器

随着数字技术的迅速发展, 应用于电机控制的微处理器也不断更新, 其中 TI 公司的数字信号处理器 TMS320F2182 是其中之一。它有以下特点:

1) 高度集成化。交流调速专用数字信号处理器除了集成有通常微处理器的运算和相关单元外, 还集成了交流调速系统的 PWM 信号发生单元、充足的模数变换单元、针对光盘盘信号采集的接口和同步串行数据接口等。TMS320F2812 的硬件上集成了以下功能模块:

- 集成有 32 位的中央算术逻辑单元与 32 位的加法器, 16×16 位的并行乘法器, 以得到 32 位的乘积。18KB 的 16 位的双端口数据/程序 SRAM, 以及 128KB 的 16 位的 Flash 存储器, 保证有充足的程序和数据存储空间。
- 集成有一片 12 位模数转换器, 并且经内部的多路转接开关可以直接对 16 路模拟量信号进行采样, 为交流调速系统中电流采样、电压采用提供了足够的输入通道。还

有一路同步串行接口 (SPI) 与两路异步串行接口 (SCI), SPI 能够与具有同步串行接口的集成电路连接, 例如旋转变压器数字变换器, SCI 能够与上位机或者其他计算机通信。

- 具有丰富的中断支持能力。3 种外部中断, 经外部中断模块扩展后可支持高达 96 个外部中断。集成有两个独立的事件管理器, 内含 4 个通用定时器以及 PWM 发生模块, 可由硬件直接产生 PWM 调制信号。该 DSP 可以由三种方式产生 PWM 信号, 分别是由定时器形成 3 路 PWM 信号, 由全比较器形成 6 路 PWM 信号、由半比较器形成 3 路 PWM 信号, 其中由全比较器产生的 6 路信号可进行三相桥控制。

2) 高运算速度。提高微处理器的运算速度始终是 DSP 发展的目标之一, 快速运算使得交流调速系统能够在一个采样周期内完成更复杂的运算, 实现各种控制律的算法。TMS320F2812 具有单指令周期的乘法指令, 可以实现快速的控制律运算, 其 CPU 时钟频率最高可达 150MHz, 大大提高了处理速度。

3) 低功耗。TMS320F2812 采用高性能静态 CMOS (Static CMOS) 技术, 核心供电电压 1.8V, I/O 口供电电压 3.3V, 与上一代 5V 供电的 DSP 相比, 功耗大大降低。

1.3 本书的结构与内容

本书前两章为概述, 后七章为主体内容, 读者对象是针对已有直流电动机调速系统基础的读者, 章节安排遵循由浅入深、由简单到复杂的原则, 方便读者对交流调速系统原理和方法的理解。各章内容如下:

第 2 章为交流调速方法和调速特性的概述。这一章对交流电机的调速原理、调速方法和调速特性等进行了归纳, 指出变频调速方法的优点, 并且介绍了交流电动机等效变换的基本思想, 以及航空交流调速系统的特点。

第 3 章为静止变频器控制技术, 包括各种方波逆变器、正弦脉宽调制 (SPWM) 逆变器、空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 逆变器控制原理, 以及逆变器的谐波分析。

第 4 章为无刷直流电动机的原理与控制方法, 内容包括无刷直流电动机工作原理、Y 形接法和 Δ 接法电机的换相控制方法、脉动转矩分析和双重绕组无刷直流电动机的原理和工作特性。

第 5 章为无刷直流电动机调速系统, 内容包括无刷直流电动机的运行 (四象限) 控制、无刷直流电动机调速系统的结构和动态数学模型、余度结构的无刷直流电动机控制系统、航空多余度电力传动系统。

第 6 章为异步电动机变频调速系统, 内容包括异步电动机变频调速特性、异步电动机运行控制方法和特性、转速开环的变频调速系统、转速闭环的转差角速度控制的变频调速系统。在运行控制和特性中重点讨论了异步电动机的起动和制动控制方法与性能。

第 7 章为同步电动机矢量控制调速系统, 内容包括同步电动机静止坐标系数学模型、 $d-q$ 坐标系数学模型和坐标变换方法、同步电动机的转子磁场定向和气隙磁场定向的矢量控制原理、永磁同步电动机矢量控制调速系统和电磁式同步电动机矢量控制调速系统、同步电动机的功率因数控制等。

第 8 章为异步电动机矢量控制调速系统, 内容包括异步电动机多变量数学模型、旋转坐标系数学模型和坐标变换方法、异步电动机矢量控制的调速系统和直接转矩控制的调速

系统。

第9章为开关磁阻电动机调速系统，内容包括开关磁阻电动机的结构与工作原理、开关磁阻电动机的转矩与电流特性、开关磁阻电动机的控制方法、开关磁阻电动机调速系统，以及开关磁阻电机在航空领域的应用。

习题

1. 交流调速系统与直流调速系统比较有什么特点？哪些原因导致了交流调速技术的发展？
2. 为什么说交流调速技术的发展依赖于电子技术的发展？电力电子器件的发展在交流调速技术中的地位是什么？
3. 微处理器技术的发展对交流调速技术的发展起到了什么作用？