



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

(第三版)

电机控制

The Control of Electrical Machinery

贺益康 许大中 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电机控制

The Control of Electrical Machinery

(第三版)

贺益康 许大中 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

内容简介

本书主要讨论电力电子技术在电机的能量变换、速度调节、特性控制中,特别是节能降耗、新能源开发中的应用技术,以及电力电子装置非正弦供电对电机的运行性能影响及分析。其内容是电机原理、电力电子技术、传感技术、控制理论及微机数字控制技术的有机结合,体现了电子、计算机、信息等高新技术对传统机电技术的改造及当今电机行业发展的新趋势。

本书为《电机控制》的第三版,是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,全国高等学校电气工程及自动化专业统编教材,可供电机电器专业研究生用作教学参考书。对于从事电机、电力电子及电力传动领域中的研究、设计及运行工程技术人员也有较好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

电机控制 / 贺益康, 许大中编著. —杭州: 浙江大学出版社, 2010.5

ISBN 978-7-308-07573-2

I. ①电… II. ①贺… ②许… III. ①电机—控制系统
IV. ①TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 076418 号

电机控制(第三版)

贺益康 许大中 编著

责任编辑 李桂云

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排版 杭州中大图文设计有限公司

印刷 富阳市育才印刷有限公司

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 18.5

字数 474 千

版印次 2010 年 5 月第 3 版 2010 年 5 月第 10 次印刷

书号 ISBN 978-7-308-07573-2

定价 28.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

前 言

《电机控制》一书最早是根据 1992 年 9 月全国高等学校电机专业教学指导委员会第六次全体(扩大)会议讨论通过的电机控制课程教材编写大纲编写,于 1995 年 2 月由浙江大学出版社出版,并作为全国高等学校电机及其控制专业的统编教材在全国发行。1999 年 11 月全国高等学校电机电器及其控制专业教学指导委员会第三次会议上,决定该书作为面向 21 世纪推荐教材再次编写。同时,为适应原电机电器及其控制专业进一步拓宽成为电气工程及其自动化专业后更为宽广的专业方向和综合人才培养的需要,以将电子、计算机、信息技术更为有机地结合进传统电机学科为目标,重新编写了《电机控制(第二版)》。2002 年 5 月通过了教育部评审,被列入了普通高等教育“十五”国家级规划教材。多年来该教材作为全国高等学校电气工程及其自动化专业课统编教材在全国高等院校有关专业中广为使用,多次重印。随着电机控制技术的进步和高素质电机人才的培养要求,对使用多年的《电机控制(第二版)》进行修订已势在必行。为此,作者对原书内容进行了全面增补、修订,规划并重写本书的第三版。2007 年《电机控制(第三版)》通过了教育部评审,再次被列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材,并继续作为全国高等学校电气工程及其自动化专业课统编教材和电机电器专业研究生教学参考书使用。

本书内容共分六章及两个附录。

- 第 1 章为直流电动机的控制,介绍了直流电动机的晶闸管可控整流调压调速和自关断器件的直流脉宽调制(PWM)调压调速,分析了双闭环直流调速系统的构成和工作原理,系统讨论了双闭环调速系统实现优化设计的工程方法,针对电力电子装置供电对直流电机最为关键的换向性能影响也作了深入分析。

- 第 2 章为异步电动机的控制,首先系统地介绍了异步电动机各种调速方法的机理和分类,分别讨论了交流调压调速、电磁滑差离合器调速、变极调速、串级调速和双馈调速技术。变频调速是本章的重点,结合电机原理、电力电子技术,分别从变频调速理论、静止变频器、脉宽调制(PWM)技术、变频调速系统及高性能的控制策略(矢量变换控制,直接转矩控制)等诸多方面进行了详细讨论。

- 第 3 章为同步电动机的变频调速控制,分别介绍了同步电动机它控式及自控式变频调速系统的工作原理和系统构成、同步电动机的矢量变换控制技术,对永磁同步电动机常用的几种矢量控制策略也作了详细讨论。

- 第 4 章为交流发电机的励磁控制,这是电机电子控制的另一重要方面内容。本章首先介绍了同步发电机对励磁系统的基本要求,随后系统地讨论了它励式、自励式和自复励等典型的励磁系统,对于 20 世纪 90 年代出现的先进交流励磁发电技术,更结合作者在变速恒频风力发电研究中的技术成果进行详细介绍。

● 第5章为位置检测式调速电动机及其控制，这是一类以带位置检测器为特征的机电一体化新型调速电机系统，包括永磁无刷直流电动机和开关磁阻电动机。本章中全面讨论了它们的原理、构造、调速系统构成及其控制。

● 第6章为电机的微机控制，即微机数字控制技术在电机控制领域中的应用。与一般的微机控制技术书籍不同，本章仅从电机控制的数字实现角度简明地讨论了电机采用微机控制的特点及优势，实现电机微机控制最常用的基本硬、软件技术等；并以直流电机 PWM 可逆调速、交流电机 SPWM 变频调速为例介绍了微机控制的具体实现方法。

● 附录中则给出了本书在异步电机高性能控制中所用的坐标变换理论和异步电机基本方程式。

● 此外，作为一本完整的教材，本书各章均配备有一定数量的思考题和习题，以利学习。与《电机控制(第二版)》相比，本书内容的重要修订是：

(1) 直流电动机的控制中，对晶闸管一直流电动机的双闭环调速系统从系统形成过程的角度作了更完整的讨论，更利于掌握；对直流电动机的脉宽调制调速增补了受限单极性电路的分析。

(2) 在异步电动机控制中，从电力电子技术角度加深了异步电动机调压调速的机理分析，增加了在恒流软起动中应用；深化了谐振软开关技术在电机调速控制中的应用，特别讨论了带直流谐振环节的 PWM 逆变器—异步电动机变频调速系统；为接近工程实际并跟踪新技术的发展，增加了变频器桥臂元件开关死区设置影响的讨论，更将具备功率双流动能力的 PWM 整流—PWM 逆变器形式的变频器列入了学习内容。

(3) 增加了直接转矩控制新内容，与矢量变换控制一起构成了异步电动机的高性能控制新章节。

(4) 配合永磁电机调速技术迅速发展的学习需要，在同步电动机的变频调速控制中增加了永磁同步电动机的矢量控制策略新章节。

(5) 考虑到当今新能源开发的新形势，特别是学习变速恒频风力发电技术的需要，增补了双馈异步发电机的交流励磁控制一节，并将第4章更名为交流发电机的励磁控制。

本书由浙江大学贺益康教授、许大中教授共同编写。鉴于编著者水平有限，书中难免有不当或错误之处，恳请读者批评指正。

编著者

2009 年 11 月于浙江大学

目 录

绪论	1
第 1 章 直流电动机的控制	9
1.1 晶闸管供电直流电动机的机械特性	9
1.2 晶闸管一直流电动机调速系统	15
1.3 直流电动机的脉宽调制(PWM)调速	24
1.4 直流电动机调速系统的特性及其优化	32
1.5 晶闸管供电对直流电动机换向的影响	48
思考题与习题	53
第 2 章 异步电动机的控制	54
2.1 异步电动机的调速方法	54
2.2 异步电动机的调压调速	56
2.3 电磁滑差离合器(电磁调速电机)	63
2.4 绕线式异步电动机的调速	65
2.5 异步电动机变极调速	75
2.6 异步电动机变频调速理论	78
2.7 静止变频器	94
2.8 异步电动机变频调速系统	126
2.9 异步电动机的高性能控制	134
思考题与习题	160
第 3 章 同步电动机的变频调速控制	162
3.1 同步电动机的结构形式和运行性能	163
3.2 无换向器电机(自控式同步电动机变频调速系统)	167
3.3 同步电动机矢量变换控制	178
3.4 永磁同步电动机矢量控制策略	183
思考题与习题	189
第 4 章 交流发电机的励磁控制	190
4.1 对同步发电机励磁的基本要求	190

4.2 它励式励磁系统	194
4.3 自励式半导体励磁系统	198
4.4 相复励励磁系统	201
4.5 双馈异步发电机的交流励磁控制	206
思考题与习题	215
第 5 章 位置检测式调速电动机及其控制	216
5.1 永磁无刷直流电动机原理	216
5.2 永磁无刷直流电动机的控制	225
5.3 开关磁阻电动机原理	231
5.4 开关磁阻电动机的控制	237
思考题与习题	243
第 6 章 电机的微机控制	244
6.1 电机的微机控制概述	244
6.2 电机微机控制中的基础技术	252
6.3 直流电动机调速系统的微机控制	266
6.4 SPWM 变频器的微机控制	269
思考题与习题	278
附录 I 坐标变换理论	279
附录 II 异步电机基本方程式	284
参考文献	289

绪 论

中国矿业大学北京

人类社会发展的历史进程中,能源永远是人类赖以生存的物质基础、科学技术进步的动力。电工技术的发展更是和能源的获取、变换、利用紧密联系在一起。由于电能的生产、变换高效,传输分配容易,使用控制方便,因而获得了最为广泛的应用。电能的生产 and 利用更涉及机械与电气两种形态能量之间的转换,电机(电动机、发电机)作为机电能量转换的设备所处位置关键,使得电机技术的发展直接关系到能源的有效变换和利用,能源的开发和节约更是当今节能降耗、新能源开发的主要技术手段,十分关键和重要。

一般而言,电机技术包括电机制造技术和电机控制技术两个方面。电机制造技术主要是电机本体的优化设计、加工制造、工艺处理等技术,涉及较多的传统电工及机械、材料学科的内容。电机控制技术则主要服务于电机的运行、特性控制,最主要是电动机的速度控制和发电机的励磁调节。随着电力电子技术、微电子技术、传感技术、微机控制技术在电机控制中的应用,电机控制是以电子控制为主要形式,已逐渐成为了一门以电机为机械本体,集信息技术、微电子技术于工作机械于一体的机电一体化技术,更是以高新技术改造传统机电技术的重要手段。本书主要讨论电机的电子控制,特别是交流电机的控制技术。

一、电动机的速度控制

现代工业生产中有两种情况需要实现电机的速度控制:

1. 满足运行及生产工艺要求

可以用车床、机动车辆、轧钢机如何为满足生产工艺要求而实施电机的控制为例来说明。

对于车床来说,毛坯粗加工时,要求工件旋转慢、切削量大,需控制主轴电机运行在低速、大转矩状态;成品精加时要求工件旋转快、切削量小,需控制主轴电机运行在高速、小转矩状态。可以看出这两种加工工况分别提出了对电机实施转速、转矩控制的不同要求。

对于机动车辆(车辆电驱动)而言,上坡时要求运行在低速、大转矩(恒转矩)状态,下坡时实行动能回馈形式的再生制动(非机械抱闸形式的摩擦能耗制动);平路飞驰时要求高速、小转矩的恒功率运行,防止过载以保护机电装置的运行安全。可以看出这些驱动工况分别提出了对电机实施电动/发电、恒转矩/恒功率的多状态运行控制要求。

对于轧钢机这类高性能机电控制系统来说,为确保钢材金属结晶结构均匀,要求稳态运行时稳速精度高;为减少结晶不均匀的钢材损耗,提高生产效率,要求电机转矩动态响应速度快,使“咬钢”时的动态速降小,恢复时间短,钢材不合格部分裁切量少。为适应钢材的往返轧制需要,要求驱动电机能作正/反转、电动/制动的四象限可逆运行。可以看出这一类高性能机电运动控制系统已对电机提出了转矩的动态控制和四象限可逆运行的高要求。

2. 实现调速节能

采用速度调节方法实现节能降耗已是当前电机控制技术中的重要功能和应用方式,特别是通过速度控制实现风机、水泵的流量调节,可以获得巨大的运行节能效果。过去拖动风机、水泵的电机常作恒速运行,使输入风机、水泵的功率恒为额定值,而输出流量大小是通过设置挡风板或调节阀门开度来调节,这使得在挡板、阀门上产生大量能耗,故是一种耗能的流量调节方式。如果去除风道上的挡板或管道内的阀门,尽可能地减小了管道阻力及相应损耗,而通过调节拖动电机的转速来调节流量,这可使转速下降时电机的输入功率随转速的立方关系减小,从而可获得高达 20%~30% 的节能效果。这是一种通过电机控制技术改变运行方式来获得节能的范例。

按照电机类型的不同,电机的速度控制可区分为直流调速和交流调速两大类。

直流调速即对直流电动机的速度实施控制。由于直流电动机中产生转矩的两个要素——电枢电流和励磁磁通相互没有耦合,并可通过相应电流分别控制,因此直流电动机调速时易获得良好的控制性能及快速的动态响应,在变速传动领域中过去一直占据主导地位。然而由于直流电机需要设置机械式换向器和电刷,使得直流调速存在固有的结构性缺陷:

(1)机械换向器结构复杂、成本增加,同时机械强度低,电刷容易磨损,需要经常维护,影响运行可靠性。

(2)运行中电刷易产生火花,限制了使用场合,不能用于化工企业、矿山、炼油厂等有粉尘、腐蚀、易燃物质或气体的恶劣环境。

(3)由于存在换向问题,难以制造成大容量、高转速及高电压直流电机,其极限容量与转速乘积限制在 $10^6 \text{ kW} \cdot \text{r/min}$,使得目前 3000r/min 左右的高速直流电动机最大容量只能达 (400~500)kW;低速直流电动机也只能做到几千千瓦,远远不能适应现代工业生产向高速大容量化发展的需要。

交流调速即对交流电动机的速度实施控制。交流电机,尤其是笼型异步电动机,由于结构简单、制造方便、造价低廉,坚固耐用、无需维护、运行可靠,更可用于恶劣的环境之中,特别是能做成高速大容量,其极限容量与转速乘积高达 $(400 \sim 600) \times 10^6 \text{ kW} \cdot \text{r/min}$,因此在工农业生产中得到了极为广泛的应用。但是交流电动机调速、控制比较困难,这是由于同步电动机的气隙磁场由电枢电流和励磁电流共同产生,其磁通值不仅决定于这两个电流的大小,还与工作状态有关;异步电动机则因电枢与励磁同在一个绕组中实现,两者间存在强烈的耦合,不能简单地通过控制电枢电压或电流来准确控制气隙磁通进而控制电磁转矩,因而不能有效地实现电机的运动控制。

交流电机调速原理早在 20 世纪 30 年代就进行深入的研究,但一直受实现技术或手段的限制而进展缓慢。早期传统的交流调速多采用电磁装置和水银整流器或闸流管等原始变流元器件来实现,最早是绕线式异步电动机转子串电阻调速,在吊车、卷扬机等设备中得到较为广泛的应用,但采用这种方法调速时会在电阻上耗费大量的电能,运行效率低下。20 世纪 50 年代发展了异步电机定子串饱和电抗器实现调压调速的简单方法,但仍有转子损耗引起严重发热问题。笼型转子异步电机变极调速是一种高效的调速方法,但速度变化有级,应用范围受到限制。为了提高绕线式异步电机转子串电阻调速的运行效率,20 世纪 30 年代就提出了串级调速的思想。这种方法把原本消耗在外接电阻上的转子滑差功率引出,经整流变为直流电能

供给同轴联接的直流电动机,使这部分能量变为机械功加以利用。交流电机变频调速是一种理想调速方法,早在 20 世纪 20 年代对此就有明确认识:既能在宽广的速度范围内实现无级调速,也不会在调速过程中使运行效率下降,更可获得良好的起动运行特性。但由于当时采用的水银整流器和闸流管性能不理想而未能推广使用;采用旋转变流机作变频供电也因技术性能不如直流调速而未能推广使用。

20 世纪 50 年代中期世界上第一只晶闸管研制成功,开创了电力电子技术发展的新时代。从此“电子”进入强电领域,电力电子器件成为弱电控制强电的桥梁与纽带,使得电能的变换、利用更加方便和高效,大大地促进了电机调速与控制技术的飞速发展。首先电力电子技术的应用使直流电机调速系统摆脱了以往笨重的电动—发电机组供电形式,进步到了采用可控整流器的简洁供电方式,加上线性集成电路、运算放大器的应用和调节器的优化,现代直流调速技术的静、动态性能获得了很大的提高。与此同时,交流电机调速技术的发展也获得了一次飞跃,尤其是 20 世纪 70 年代中期世界范围内出现了能源危机,节约能源成了人们普遍的共识。作为节约电能的重要手段,交流电机调速引起了人们的重视,尤其是拖动风机、水泵、压缩机的交流电机实施以调速来调节流量的运行方式改造后,产生了巨大的节能效果,更为有力地推动了交流调速技术本身的快速发展。

交流电机调速方法众多,技术手段各异,但可从电机运行原理的角度予以合理分类。

对于异步电机而言,根据电机原理,从定子通过气隙传入转子的电磁功率 P_M 可以分为两部分:一部分是轴上的机械功率 $P_2 = (1 - S)P_M$,这是拖动负载做功的有效功率;另一部分是转子绕组内的滑差功率 $P_s = SP_M$,它与转差 S 的大小成正比。我们可以按照调速过程滑差功率是否增大、真实消耗还是得以回收来划分调速类型。

(1)滑差功率消耗型。调速过程中全部滑差功率均转换成热能形式,不可逆地被消耗掉,而且消耗越多调速范围越宽,当然运行效率将越低。常见的调压调速、绕线式异步电机转子串电阻调速、电磁滑差离合器(电磁调速电机)就属于这种调速类型。值得指出的是尽管滑差功率消耗型调速时耗能,但在风机、水泵采用调速调流量方式时仍有相当大的节能效果。这是因为离心式风机、水泵的输入功率是转速的三次方关系,随减小流量而降低转速时电机的输入功率大大减小,抵消掉因调速引起的能耗后仍有近 20% 的节能潜力,十分可观。

(2)滑差功率回馈型。调速时滑差功率的一部分被消耗掉,大部分可通过变流装置返回电网或转化为机械功被利用,以此维持较高的运行效率。绕线式异步电机串级调速就是属于此类调速方式。

(3)滑差功率不变型。这种方法主要是通过改变同步转速实现调速,滑差功率消耗水平保持不变,因而是一种真正意义上的高效调速方式,变频调速、变极调速就是具体的方法。变频调速更是交流电机的主要调速方式,以此为基础可以构成许多高性能的交流调速系统。

对于同步电机而言,由于转子速度与旋转磁场速度严格同步而不存在滑差,故其调速类型只能是滑差功率不变型,即为 $P_s = 0$ 的调速方式,加上同步电机转子极对数固定而无法采用变极调速,因而变频调速是其唯一可行的调速方法。按照变频器频率指令的来源,同步电机变频调速系统可区分为它控式及自控式两种,其中自控式同步电机变频调速系统又称无换向器电机,与它控式相比最大优点是电机本身的转速控制了变频器的供电频率,使转子与旋转磁场始终保持同步旋转关系,没有失步问题。

交流电机调速技术的发展总是与电力电子技术和微机控制技术的进步紧密联系,电力电子器件和微机构成了交流调速系统的物质基础。电力电子器件的作用更为关键,可以说新一代的器件带来了新一代的变换器,又推动了新一代交流调速系统的形成和发展。

20 世纪 60 年代初,中、小型异步电机多采晶闸管调压调速或采用晶闸管可控整流的电磁滑差离合器,取代了传统的饱和电抗器调速;而在中、大容量绕线式异步电机中,多采用晶闸管串级调速装置代替早先机组式串级调速系统,并广泛应用于风机、水泵的调速节能改造。至于变频调速,由于作为第一代电力电子器件的晶闸管没有自关断能力,由它构成的逆变器需要有附加的换流措施,由此产生了几种晶闸管的变频调速装置。最简单的是利用电机反电势换流的自控式同步电机变频调速系统(无换向器电机),这种调速电机在 20 世纪 70 年代就得到了迅速的推广,现在最大单机容量已超过 $1 \times 10^5 \text{ kW}$ 。由于异步电机的输入电流相位总是滞后于端电压,不能利用其反电势帮助逆变器中晶闸管实现换流,必须采用电容强迫换流,使得其变频调速系统电路结构一般比较复杂。这一时期还较多地发展了供单台异步电机变频调速用的串联二极管式电流源型逆变器,供多台异步电机协同调速运行的串联电感式及带辅助换流晶闸管式的电压源型逆变器,还有利用电网电压自然换流、适合于低速大容量调速传动的交—交变频器(循环换流器)。这些晶闸管逆变器的输出电流或电压波形通常是矩形波、阶梯波或正弦波拼块,除了基波外还含有较大的谐波成分,会对电机、电网产生严重的谐波负面效应。特别是其中的 5 次、7 次等低次谐波会在异步电机中引起转矩脉动、振动噪声、损耗发热、效率及功率因数下降等不良影响。这些都是由于所采用的晶闸管器件开关频率太低所致,因此必须从提高开关频率、优化输出波形着手来解决,此时电力电子器件成为了关键。

20 世纪 50 年代出现的晶闸管只是一种可控制导通但不能控制关断的半控器件,开关频率又低,但它的通态压降小,可以做成高压大容量,因而在大功率($>1\text{ MW}$)、高电压($\geq 10\text{ kV}$)的交流调速装置中仍有不可替代的地位。20 世纪 70 年代后,各种具有自关断能力的高频自关断器件随着调速节能技术的发展应运而生,主要有电流控制型的大功率晶体管 GTR、门极可关断晶闸管 GTO、电压控制型的功率 MOS 场效应晶体管 Power MOSFET、绝缘栅双极型晶体管 IGBT、MOS 控制晶闸管 MCT 等。由于电压控制(场控)型器件的驱动远比电流控制型简单、方便,因而更具发展前景。这些器件的开关频率和电压、电流容量均已达到相当高水平,在产品中已获得了广泛应用。它们的开关频率和电压、电流容量简列如下:

GTO 8000V/10000A,开关频率 1kHz;
GTR 1200V/800A,开关频率(2~4)kHz;
Power MOSFET 2000V/250A,开关频率 $>100\text{ kHz}$;
IGBT 3300V/1800A,开关频率 20kHz;
MCT 2500V/1000A,开关频率 1kHz。

20 世纪 80 年代以后,又出现了新一代电力电子器件——功率集成电路 PIC,它集成功率开关器件、驱动电路、保护电路、接口电路于一体,发展成了智能化的电力电子模块器件,目前广泛应用于交流调速中的智能功率模块 IPM 就是采用 IGBT 作功率开关器件,把集成电流传感器、驱动电路及过载、短路、过热、欠压等保护电路于一体,简化了接线,减小了体积,实现信号处理、故障诊断、驱动保护等功能,方便了使用,提高了可靠性,是电力电子器件今后发展的方向。

随着高频自关断器件的应用,进一步推动了交流调速中的变流技术和控制策略的发展。首先是脉宽调制(PWM)技术的成熟和应用。脉冲宽度按正弦规律变化的 SPWM 显著地降低了逆变器输出电压中的低次谐波,使电机运行时的转矩脉动大为减小,动态响应加快。由于脉宽调制逆变器把变频与调压结合在一起,输入直流电压无需调节,电源侧可以简单地采用二极管不控整流,从而显著提高了调速系统输入侧功率因数。所用自关断器件开关频率的提高又使逆变器输出谐波次数升高、谐波幅值减小,有效地抑制了输出电力谐波对电机的影响,因而使 SPWM 调制技术在中、小型异步电机变频调速中获得了极为广泛的使用。

从电机原理可知,要使交流电机具备优良的运行性能,首先要向电机提供三相平衡的正弦交流电压,当它作用在三相对称的交流电机绕组中时,就能产生三相平衡的正弦交流电流。若交流电机磁路对称、线性,就能在定、转子气隙中建立单一转向的圆形旋转磁场,使电机获得平稳的转矩、均匀的转速和优良的运行特性,这在大电网供电下自然是能得到满足,但在变频器开关方式供电下就有一个发展过程。正弦脉宽调制 SPWM 追求的是给电机提供一个频率可变的三相正弦电压,并未关心电机绕组内的电流和电机气隙中的旋转磁场。另一种电流跟踪型脉宽调制方式则是避开电压的正弦性,直接追求在电机三相绕组中产生频率可变的对称正弦电流,这比只考虑电压波形进了一步。电流跟踪型 PWM 逆变器为电流控制型电压源逆变器,兼有电压和电流控制逆变器的特点,其中滞环控制电流跟踪 PWM 更因电流动态响应快、实现方便而受到重视。为了追求采用逆变器开关切换能在电机内部生成圆形磁场的效果,近期又研究出磁链跟踪型脉宽调制技术。它将逆变器与交流电机作为一个整体来考虑,通过对逆变器开关模式的控制,形成不同的三相电压组合(电压空间矢量),使其产生的实际磁通尽可能地逼近理想的圆形磁通轨迹——理想磁链圆,从而使变频器的性能达到一个更高水平。这种方法采用三相统一处理的电压空间矢量来决定逆变器的开关状态,形成 SVPWM 波形,操作简单方便,易于实现全数字控制,已呈现取代传统 SPWM 的趋势。

由于交流电机定、转子各相绕组之间的耦合紧密,形成了一个复杂的非线性系统,使其转矩与电流不成正比,瞬时转矩控制困难,导致交流电机调速系统的动态性能不如直流调速系统优良。为了有效地控制交流电机的转矩,改善交流调速系统的动态性能,1973 年德国 F. Blaschke 提出了矢量变换控制方法,它以坐标变换理论为基础,参照直流电机中磁场(励磁电流)与产生电磁转矩的电枢电流在空间相互垂直、没有耦合、可分别控制的特点,把交流电机的三相定子电流(电流空间矢量)经坐标旋转变换,也分解成磁化电流分量和与之垂直的转矩电流分量,通过控制定子电流矢量在旋转坐标系中的位置和大小,实现对两个分量的分别控制,也就实现了对磁场和转矩的解耦控制,达到与直流电机一样有效地控制电机瞬时转矩的目的,使之具有较好的动态特性。

矢量控制方法的采用使交流电机调速系统的转矩动态性能得到了显著的改善,开创了用交流调速系统取代直流调速系统的新时代,这无疑是交流传动控制理论上的一个质的飞跃。但是经典的矢量控制方法要进行坐标变换,比较复杂;而异步电机矢量控制时坐标轴线需要以转子磁链来定向,其计算比较繁琐,精度常受转子参数变化的影响,造成矢量变换控制系统的控制精度随运行状态变化,达不到理想效果,对此各国学者又相继提出了不少新的控制策略,如转差矢量控制、标量解耦控制、直接转矩控制等。这些新的控制方法又进一步改进了交流电机的控制性能,使得现代高性能交流调速系统的动态性能已完全能达到甚至超过直流电机调

速系统的水平。

高性能的控制策略涉及复杂的变换关系和实时数学运算,这又促进了微机数字控制在交、直流调速传动中的应用和发展。众所周知,常用的电子控制方式有采用模拟电子电路的模拟控制和采用数字电子电路的数字控制。在 20 世纪 70 年代之前,交、直流调速系统多采用模拟控制方式,由众多的线性运算放大器、二极管、三极管等模拟器件构成控制器。这种控制装置体积大、可靠性差,特别是存在温度漂移对器件参数的影响而稳定性差,又难于实现信息存储、逻辑判断,复杂的数学运算控制(如矢量变换控制)几乎无法实现。随着数字电路、微机技术的发展,采用计算机软件实现各种规律控制已成可能。大规模集成电路技术的成熟出现了微处理器、微控制器,使得电机的电子控制步入了一个崭新的数字化阶段。当前,以单片机为主体的微型计算机已成为调速系统数字控制的核心,展现出十分优越的控制性能:

- (1)数字控制器硬件标准、简洁,成本低,可靠性高;
- (2)数字控制实现灵活,功能齐全,可以按需编写、更换软件,具有最大的柔性;
- (3)可实现复杂的逻辑判断、数字运算,使得新型、复杂的控制策略能得以实现。

与模拟控制相比数字控制实时性较差,模拟量数字化时引入的量化误差影响控制精度和平稳性,但随着微机运算速度和字长的提高这些障碍将得到克服。目前广泛采用的微处理器主要类型有美国 INTEL 公司的 MCS—51 系列的八位单片机、MCS—96 系列的 16 位单片机,美国 TEXAS 公司的 TMS320 系列的 16 位、TMS28XX 系列 32 位数字信号处理器(DSP)等,它们的应用和进步大幅度地提高了调速系统的控制性能。

二、发电机的励磁调节

电机控制中另一个有重要意义的领域是励磁调节。现代工业生产和人民生活对发电机的供电质量要求越来越高,发电机励磁系统的好坏更直接影响发电机系统的供电质量和运行稳定性、可靠性。现代同步发电机对励磁系统的要求是多方面的,不但要能及时地根据发电机负荷变化情况调节其励磁电流,维持机端电压在一定水平上,并使各并联运行机组的无功功率得到合理分配,而且要求反应迅速,以利于提高电力系统的静态稳定性。在电力系统和电机内部发生故障和扰动时,更要求励磁系统能作出快速响应,以提高发电机的动态稳定性和安全可靠。这包括在电力系统发生短路或其他原因使机端电压严重下降时要能进行强行励磁,提高电力系统的动态稳定性;在电力系统突甩负荷时能实现强行减磁,以防止发电机端电压的过分升高;在发电机定子绕组出现匝间短路故障时,能快速灭磁以避免事故的扩大。

一般来说,同步发电机的励磁系统包括了两方面的问题,即励磁功率的来源和励磁调节的方式。发电机的励磁功率从外部独立电源获得时称它励式,从发电机本身发出的电功率中获取时称自励式。它励式要有单独励磁电源,比较复杂,但在发电机端发生短路故障时有较强的励磁能力,有利于发电机运行时的动态稳定性,但为简化励磁系统,现代中、小型同步发电机基本上都采用自励的方式。至于励磁调节方法,过去只有按发电机电压、电流偏差进行调节的比例式调节方式,现在除采用按电压、电流偏差进行调节外,还引入了电压、电流的导数及转速、频率等信号作为依据的强励调节方式,用以改善电力系统动态性能。在中、小型同步发电机中则广泛采用具有自动调节励磁能力的相复励系统,以保持发电机端电压稳定不变,且在发电机

或电网发生短路故障时仍能维持自励并提供一定的强励能力。

交流励磁发电是 20 世纪 90 年代以来开发出的新型励磁方式,它是在异步发电机的转子绕组中采用变频器提供滑差频率的三相交流电以实现励磁,可使发电机在变速的情况下发出恒定电网频率的交流电能;同时采用矢量变换控制技术,实现发电机的有功功率、无功功率独立调节。交流励磁实现的变速恒频发电技术可用于水头或落差有变化,或为避免多泥沙水流对水轮机叶轮冲击损伤的变速运行水力发电系统,以及风速随机变化的风力发电系统。

近年来在绿色能源、特别是风能的开发、利用中,现代风力发电技术获得了广泛的关注,已在世界范围内得到了飞速的发展。目前广泛采用的变速恒频风力发电系统主要有采用交流励磁方式的双馈异步发电机和采用交-直-交全功率变换方式的永磁同步发电机,它们都是传统电机与现代电力电子技术、高性能电机控制策略相结合,使电机运行于发电状态的高新技术手段,达到新能源高效开发利用的目的。

三、电机控制技术的发展动向

电机的电子控制是一门集电机运行理论、电力电子技术、自动控制理论和微机控制技术于一体的机电一体化技术,随着这些相关技术的飞速进步,电机控制技术正在日新月异地不断发展。目前的发展动向主要表现在:

1. 变流装置

随着一代代自关断器件的陆续产生,调速系统变流装置正朝高电压、大容量、高频化、小型化方向发展,适合中电压($\geq 10\text{kV}$)、大容量($\geq 10\text{MW}$)的变频器已获得应用。随着功率器件开关频率的提高,PWM 调制技术进一步优化,可以获得十分理想的正弦电压输出。变频器电网侧的交-直变换虽采用不控整流可使基波功率因数(位移因数)接近于 1,但因输入电流谐波大而使得总功率因数低下。消除对电网的谐波污染、提高系统输入功率因数、优化变频器输入特性已成为当前变频技术关注热点。因此,PWM 整流技术、新型单位功率因数变流器(如矩阵式交-交变换器)的研究、开发已引起广泛关注。

与此同时,如何提高变频器的开关频率也受到重视,特别是大功率逆变器中功率开关频率主要受到开关损耗的限制,如何降低开关损耗是变频器高频化的关键。近年来已研究出了应用谐振原理使功率器件在零电压或零电流下进行开关的软开关技术,其开关损耗接近为零,大大提高了变流器的运行效率。

2. 控制策略

交流电机是一个多变量、强耦合、时变的非线性系统,瞬时转矩控制困难,造成长时间以来其动态性能不如直流电机优良。20 世纪 70 年代提出的矢量变换控制开创了交流电机高性能控制的新时代,但矢量变换控制也有不尽如人意之处。1985 年德国学者 Depenbrock 又提出了直接转矩控制,它将电机与逆变器作为一个整体来考虑,采用电压空间矢量方法在定子坐标系内进行磁通、转矩的计算,通过磁链跟踪型 PWM 逆变器的开关切换直接控制磁链和转矩,无须进行定子电流解耦所需的复杂坐标变换,系统控制更为简单、直接,动、静态性能优越,目前正受到广泛的关注。

各类电机闭环控制中常需检测转子速度或磁极位置,因而带来了传感器安装、维护、环境

适应性及运行可靠性等诸多问题。为了降低造价并提高可靠性,国外从 20 世纪 70 年代开始进行了无速度传感器控制技术的研究。最初是利用检测定子电压、电流等易测量和电机模型进行速度估算,后来采用了模型参考自适应方法(MRAS)进行速度辨识,近年已将卡尔曼滤波器理论用于电机的参数辨识。为解决静止和极低速情况下电机转子位置(速度)的自检测,高频电压(电流)注入法也已引入了交流电机的无位置(速度)传感器运行研究中。目前无速度传感器技术已应用于商品化变频器之中。

3. 全数字化控制

随着微机运算速度的提高、存储器的大容量化,全数字控制已是电机控制方式的主流方向。目前除采用各类单片微机作为数字控制器核心外,数字信号处理器(DSP)已展现出越来越大的优势。与普通单片机相比,DSP 改变了集成电路结构、提高了时钟频率,采用指令列排队方式来提高运行效率,更集成了硬件乘法器,大大缩短了乘、除运算时间,特别适合于复杂数学运算。近来又增加了 I/O 口,提高了作为微控制器的功能,形成了电机控制专用系列,已在商品变频器中得到了应用。

20 世纪 80 年代后期,又出现了一种精简指令计算机 RISC,它依靠硬件与软件的优化组合,提高了常用基本指令的执行速度,丢弃了一些运算复杂而不常用的指令,实现了在一个给定周期内并行执行多条指令的能力,以此提高了软件总体效率和执行速度,以一种新的方式解决了数字控制实时性问题。

为了解决控制器的小型化,出现了高级专用集成电路 ASIC,如变压变频用的 SPWM 序列波发生器 HEF4752、SLE4520 等,甚至还有包括一个完整控制系统的 ASIC 面市。现在开发各种新一代 ASIC 已成为先进电气公司当前技术竞争的手段。如果用户欲自己开发电机专用控制芯片,现场可编程门阵列 FPGA 是一种有效解决方案。这是一种可以方便实现多次改写的逻辑器件,一片 FPGA 包含有少则几千、多则几十万个逻辑门,可以用来实现非常复杂的运算,替代多块集成电路和分立元件,且具有很强的保密能力。现在,采用 DSP+FPGA+IPM 构成电机控制系统已是一种较先进的硬件格局。

4. 智能控制理论的应用

基于现代控制理论的滑模变结构控制,采用微分几何理论的非线性解耦控制、模型参考自适应控制等均已引入电机控制。但这些方法仍建立在对象精确的数学模型之上,需要大量传感器、观测器,结构复杂,仍无法摆脱系统非线性和参数变化的影响。智能控制无需对象的精确数学模型并具有较强的鲁棒性,近年已被陆续引入电机控制之中,如模糊控制、人工神经网络控制、专家系统等,使电机控制正朝智能化控制方向发展。

第 1 章

直流电动机的控制

直流电动机由于具有良好的调速特性,宽广的调速范围,长期以来在要求调速的地方,特别是对调速性能指标要求较高的场合,例如轧钢机、龙门刨和高精度机床等传动中得到了广泛的应用。

以前直流电机调速系统采用直流发电机组供电,不仅重量大,效率低,占地多,而且控制的快速性比较差,维护也比较麻烦。近年来随着电力电子技术迅速发展,已普遍采用了由晶闸管可控整流器供电的直流电机调速系统,以取代以前广泛应用的交流电动机—直流发电机组供电的系统。特别是采用了由集成运算放大器构成的电子调节器后,晶闸管整流器供电的直流电机调速系统在性能上已远远地超过直流发电机组供电的系统。随着自关断器件的出现,脉宽调制(PWM)调速或斩波调速方式在直流调速系统中得到发展。由于调制频率高,动态响应快,在高性能直流伺服驱动中得到了广泛的应用。近几年微型计算机应用的普及,更为直流电机调速系统实现数字化和高性能化创造了条件。这些都是本章要重点讨论的内容。

1.1 晶闸管供电直流电动机的机械特性

从机电运动控制系统的控制目标看,电机控制可以区分为调速控制、位置随动(伺服)控制、张力控制、多电机同步控制等类型,但各类控制都是通过转速控制来实现其最终目标的,因此调速控制应是最基本的电机控制方式。

调速控制的依据是电动机的转速公式。对直流电动机而言,有

$$n = \frac{U_a - R_a I_a}{C_e \Phi} \quad (1.1)$$

式中 n ——转速(r/min);

U_a ——电枢电压(V);

I_a ——电枢回路总电阻(Ω);

Φ ——励磁磁通(Wb);

C_e ——由电机结构决定的电势常数。

可以看出,直流电动机有三种调速方法:

(1) 调压调速——调节电枢电压 U_a ,使电机转速在宽广的范围内平滑变化;

(2) 弱磁调速 —— 改变励磁磁通 Φ 大小使转速变化,但基于电机铁磁饱和考虑只能在额定速度以上通过弱磁作升速运行,限制了调速范围;

(3) 串电阻调速 —— 通过增大电枢电阻 R_a 实现调速,但伴随有巨大的功率损耗、发热和运行效率下降,很少采用。

因此,直流电动机主要采用调压调速方式。

传统的调压调速是通过直流发电机(G)—直流电动机(M)的 G-M 机组方式实现的,调节直流发电机的励磁电流获得可变的直流电压,供给直流电动机实现调速;改变发电机励磁电流的极性可使电动机电枢电压的极性、电磁转矩性质和电动机转向、转速均发生变化,很易实现四象限运行,其机械特性如图 1.1 所示,其特点是直流电动机电枢电流连续,机械特性硬,静差度小。

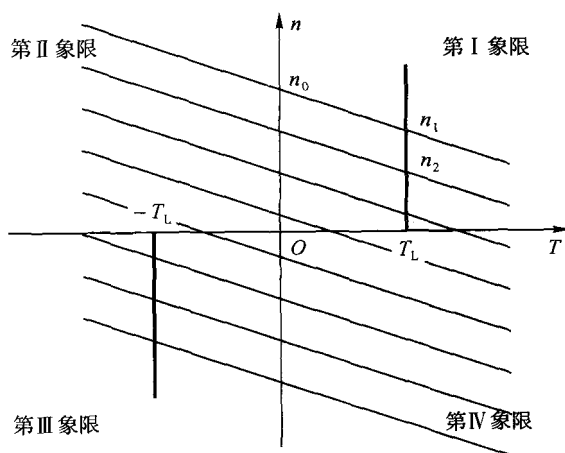


图 1.1 G-M 组机械特性

G-M 形式直流调速系统需配置旋转变流机组,因而设备庞大、成本高、效率低、动态响应慢。20 世纪 60 年代晶闸管出现后已被可控整流器供电直流电动机调速系统所替代。图 1.2 为采用三相桥式晶闸管可控整流器实现调压调速的直流调速系统主电路原理图。

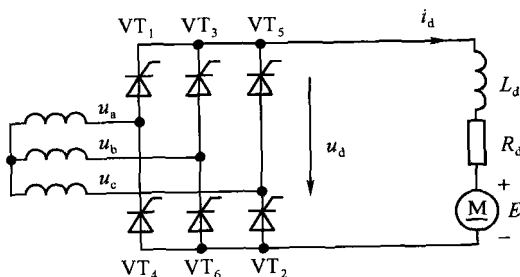


图 1.2 三相桥式可控整流器—直流电动机调速系统

可控整流器供电直流电动机调速系统中,直流电动机(包括电枢回路所串平波电抗器)是可控整流电路的一种带电感的反电势负载,电流容易出现断续现象,这是传统 G-M 组形式直流调速系统中未曾出现过的现象。一旦电枢电流断续,调速系统的机械特性很软,无法承担