



李志民 张遇杰 编著

同步电动机 调速系统

电气自动化
新技术
丛书

机械工业出版社

电气自动化新技术丛书

同步电动机调速系统

李志民 张遇杰 编著



机械工业出版社

本书较全面系统地介绍了同步电动机调速的基本原理、系统组成、控制思想和数学模型,并对四种典型的调速系统进行了深入的分析和详细的阐述,同时还介绍了几种转子(或磁场)位置的检测技术。

本书深入浅出,着重基本概念、原理的论述和典型实际系统的分析,公式推导详细严密。内容联系实际,实用性强。

本书适合于从事电气传动自动化领域工作的科研、工程技术人员阅读和参考,也可作为高等院校自动化专业的研究生、高年级本科生的教材和教学参考书,亦可作为工程技术人员继续教育的培训教材。

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码 100037)
责任编辑:孙流芳 版式设计:李松山 责任校对:丁丽丽
封面设计:姚毅

三河永和印刷有限公司印刷 · 新华书店北京发行所发行

1996年8月第1版 1996年8月第1次印刷

850mm×1168mm/32·6.75印张·180千字

0 001—5000册

定价:13.00元

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展,对于改变社会的生产面貌,推动人类文明向前发展,具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合,特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天,电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问,电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术,中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会,负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色:

一、本丛书是专题论著,选题内容新颖,反映电气自动化新技术的成就和应用经验,适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际,重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出,条理清晰,语言通俗,文笔流畅,便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者,也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》,对于我们是一种尝试,难免存在不少问题和缺点,希广大读者给予支持和帮助,并欢迎大家批评指正。

本丛书选题将随新技术发展不断扩充,凡属电气自动化领域新技术均可作为专题撰写新书。我们也面向社会公开征稿,欢迎自

列选题投稿。来稿或索取稿约请函寄 300180 天津市津塘路 174 号天津电气传动设计研究所转《电气自动化新技术丛书》编辑委员会。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任委员:陈伯时

副主任委员:喻士林 夏德铃 李永东

委员:(以姓氏笔划为序)

王 炎	王文瑞	王正元
刘宗富	孙 明	孙武贞
孙流芳	过孝瑚	许宏纲
朱稚清	夏德铃	陈伯时
陈敏逊	李永东	李序葆
张 浩	张敬民	周国兴
涂 健	蒋静坪	舒迪前
喻士林	霍勇进	戴先中

《电气自动化新技术丛书》

出版基金资助单位

机械工业部天津电气传动设计研究所

深圳华能电子有限公司

北京电力电子新技术研究开发中心

天津普辰电子工程有限公司

前 言

同步电动机调速是交流调速传动的两大分支之一,是近些年发展起来的一门新技术,在电气传动领域中占有重要的地位。从国内外研究和国内引进的调速设备来看,同步电动机调速系统越来越受到电气传动专家、学者和工程技术人员的广泛重视,已经成为各国众多研究者的兴趣所在,并成为许多大公司、研究院所重点开发的技术领域。可以预计,随着电力电子学、微电子学、控制理论和控制技术的进一步发展,同步电动机调速系统及其派生出的其它类似系统将会更加完善,在国民经济的各个部门得到更广泛的应用,成为取代直流调速系统的重要力量。

本书以同步电动机调速为主线,围绕同步电动机调速的基本类型,结合作者多年从事同步电动机调速系统的研究,消化吸收引进技术工作的体会,着重基本概念、原理的论述和典型实际系统的分析,不拘泥于具体电路,力求做到内容由浅入深,公式推导详细、严密,理论阐述通俗易懂。

全书共分七章。第1章简要介绍了同步电动机调速系统的发展、分类和特点,以及与异步电动机、直流电动机调速系统的比较。第2章介绍了电机统一理论、矢量变换理论,并在上述理论的基础上详细推导了同步电动机的数学模型。第3章简单介绍了同步电动机调速的基本概念、方法、原理和构成。第4章给出了检测同步电动机转子位置的几种方法。第5~7章,分别详细介绍了永磁同步电动机、负载换相同步电动机、气隙磁场定向控制同步电动机等三种调速系统。本书第7章1~7节由张遇杰同志编写,其余各章节及附录由李志民同志编写,全书由李志民统稿。

本书适合于从事电气传动自动化领域工作的科研、工程技术人员阅读和参考,也可作为高等院校自动化专业的研究生、高年级

本科生的教材和教学参考书,亦可作为工程技术人员继续教育的培训教材。

本书承蒙我国电气传动专家、东北大学刘宗富教授主审,提出了许多宝贵的修改和补充意见。在本书的选题、编写、定稿和出版过程中,得到了中国自动化学会电气自动化专业委员会、中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会、机械工业出版社以及《电气自动化新技术丛书》编委会的大力支持与帮助。本书部分章节内容的研究还得到了冶金部人事教育司有偿与资助研究基金的支持。在编写本书的过程中,我们参阅了不少已出版的书籍和已发表的论文,并采用了其中的部分内容和成果,主要的已经列入了本书的参考文献中,以便读者进一步查阅某些感兴趣的问题。此外,在本书的编写过程中,喻士林教授级高级工程师曾多次给予指导。作者的同事张国英、王德明、张晓利、魏毅立等也为本书做出了贡献。在此对以上所提有关部门、个人以及参考文献所涉及的作者和他们的工作一并致以诚挚的感谢和敬意。

由于编者水平所限,书中一定存在不少缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

作 者

1995 年 12 月

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

前 言

第 1 章 概述	1
1.1 同步电动机调速系统发展综述	1
1.1.1 同步电动机调速系统的发展	1
1.1.2 调速用同步电动机的几种类型	3
1.1.3 同步电动机调速系统的几种典型结构及应用领域	5
1.2 同步电动机调速系统的分类及特点	5
1.2.1 交-直-交电压型同步电动机调速系统	6
1.2.2 交-直-交电流型负载换相同步电动机调速系统	7
1.2.3 交-交变频同步电动机调速系统	8
1.3 同步电动机、异步电动机、直流电动机调速系统的比较	9
1.3.1 直流电动机调速系统	10
1.3.2 异步电动机调速系统	10
1.3.3 同步电动机调速系统	11
第 2 章 同步电动机的数学模型	15
2.1 电机统一理论	15
2.1.1 空间矢量的一般定义	15
2.1.2 电机定子的磁动势	16
2.1.3 电机转子的磁动势	19
2.1.4 两绕组电机的数学模型	20
2.1.5 电机统一理论的几点结论	26
2.2 矢量控制原理	28
2.2.1 矢量控制的基本原理	28
2.2.2 矢量控制中所用坐标系	29
2.2.3 矢量在坐标系之间的变换	31
2.3 同步电动机的数学模型	35

2.3.1	双反应理论	35
2.3.2	在 $d-q$ 坐标系中凸极同步电动机的数学模型	37
2.3.3	转子磁链定向控制的凸极同步电动机数学模型	42
2.3.4	气隙磁链定向控制的凸极同步电动机数学模型	45
2.4	永磁同步电动机和无刷直流电动机的数学模型	47
2.4.1	永磁同步电动机的数学模型	48
2.4.2	无刷直流电动机的数学模型	50
第3章	同步电动机调速的基本原理	53
3.1	同步电动机调速的基本概念	53
3.1.1	同步电动机的基本结构	54
3.1.2	同步电动机的变频调速原理	55
3.2	自控式同步电动机变频调速原理	56
第4章	同步电动机转子位置检测方法	62
4.1	电磁式转子位置检测方法	62
4.1.1	差动变压器式位置检测方法	62
4.1.2	接近开关式位置检测方法	65
4.2	磁敏式转子位置检测方法	65
4.3	光电式转子位置检测方法	66
4.3.1	简单光电式转子位置检测方法	66
4.3.2	绝对式光电编码转子位置检测方法	67
4.3.3	增量式光电码盘转子位置检测方法	68
4.4	间接式转子位置检测方法	73
4.4.1	间接检测转子位置的端电压检测方法	74
4.4.2	电压模型检测方法	76
第5章	永磁同步电动机调速控制系统	78
5.1	永磁同步电动机的控制原理	78
5.1.1	永磁同步电动机的结构	78
5.1.2	永磁同步电动机的调速原理	79
5.1.3	无刷直流电动机的调速原理	81
5.2	正弦波永磁同步电动机控制系统的构成和运行	84
5.2.1	变频器的组成和控制	85
5.2.2	控制系统的运行原理	88
5.2.3	控制系统的全数字化	89

5.3 无刷直流电动机调速系统	92
5.3.1 主回路	92
5.3.2 PWM 信号的产生	93
5.3.3 PWM 信号的分配和系统的四象限运行	94
5.3.4 异步电动机、永磁同步电动机交流伺服系统的比较	97
第 6 章 负载换相同步电动机控制系统	98
6.1 负载换相同步电动机的基本工作原理	99
6.1.1 负载换相同步电动机的构成	99
6.1.2 电流型逆变器供电时交流电动机定子的磁动势	99
6.1.3 负载换相同步电动机的运行原理	101
6.2 负载换相同步电动机的换相方法	106
6.2.1 反电动势换相法(自然换相法)	106
6.2.2 电流断续换相法	109
6.2.3 由电流断续换相法到反电动势换相法的过渡	111
6.3 负载换相同步电动机的运行特点	112
6.3.1 转速公式及基本调速方式	113
6.3.2 平均电磁转矩公式	116
6.3.3 负载换相同步电动机的功率因数	120
6.3.4 换相重叠角 μ 的计算	120
6.4 负载换相同步电动机调速系统	122
6.4.1 逆变器晶闸管的触发顺序与电动机转向的关系	123
6.4.2 换相超前角 γ 与电动机运行状态的关系	124
6.4.3 转子位置检测器和逆变桥控制脉冲的分配	128
6.5 负载换相同步电动机的过载能力分析	133
6.5.1 限制过载能力的因素	133
6.5.2 提高过载能力的方法	134
6.6 负载换相同步电动机的应用实例	137
6.6.1 负载换相同步电动机在大型同步电动机起动中的应用	137
6.6.2 负载换相同步电动机在精轧机主传动中的应用	141
第 7 章 气隙磁场定向的同步电动机矢量控制调速系统	146
7.1 同步电动机气隙磁场定向控制的原理	146
7.2 三相交-交变频器的电流控制	151
7.2.1 单相交-交变频器的运行原理	152

7.2.2	三相交-交变频器的组成	153
7.2.3	三相交-交变频器的电流跟踪控制	153
7.2.4	电流跟踪控制中定子电流、电压的给定计算	156
7.3	同步电动机矢量控制系统中的电流、电压模型	158
7.3.1	同步电动机的电流模型	158
7.3.2	同步电动机的电压模型	162
7.3.3	混合式磁链模型	163
7.4	同步电动机的磁链控制	166
7.4.1	励磁闭环调节	166
7.4.2	励磁开环调节	169
7.5	同步电动机的功率因数控制	170
7.6	同步电动机矢量控制系统的速度调节	172
7.6.1	速度自适应调节器和电流限幅设定	173
7.6.2	速度反馈的陷波滤波器	176
7.6.3	动态转矩补偿环节	177
7.7	同步电动机矢量控制系统的构成和四象限运行	178
7.7.1	系统的构成	178
7.7.2	系统的四象限运行	178
7.8	同步电动机阻尼绕组的作用	182
7.8.1	阻尼绕组的结构型式	182
7.8.2	阻尼绕组的结构参数与电气参数的关系	183
7.8.3	阻尼绕组对负载换相同步电动机调速系统性能的影响	185
7.8.4	阻尼绕组对交-交变频同步电动机矢量控制调速系统性能的影响	188
附录		
附录 A	同步电机的无刷励磁	192
附录 B	同步电动机模拟器介绍	194
参考文献		198

第 1 章 概 述

1.1 同步电动机调速系统发展综述

1.1.1 同步电动机调速系统的发展

电气传动是以电动机的转矩和转速为控制对象,按生产机械工艺要求进行电动机转速(或位置)控制的自动化系统。根据在完成电能-机械能的转换过程中所采用的执行部件——直流电动机或交流电动机的不同,工程上通常把电气传动分为直流电气传动和交流电气传动两大类。

纵观电气传动的发展过程,交、直流两大电气传动并存于各个工业领域,虽然由于各个时期科学技术的发展使得它们所处的地位、所起的作用不同,但它们始终是随着工业技术的发展,特别是随着电力电子学和微电子学的发展,在相互竞争、相互促进中完善着自身,发生着变更。由于历史上最早出现的是直流电动机,所以在 19 世纪 80 年代以前,直流电气传动是唯一的电气传动方式。到 19 世纪末叶,出现了交流电,且解决了三相制交流电的输送和分配问题,并制成了经济实用的笼型异步电动机,这就使得交流电气传动在工业中逐步得到了广泛的应用,并把电气传动应用技术推向一个新的阶段,在不调速的电气传动领域,交流电动机占主要地位。由于大量使用三相异步电动机,交流电网的功率因数普遍偏低,为了改善功率因数,同步电动机诞生并开始得到发展和使用。

随着生产技术的发展,特别是精密机械加工和冶金、交通等工业生产过程的进步,对电气传动在起制动、正反转以及调速精度、调速范围等、静态特性和动态响应方面都提出了更高的要求,直流电动机比交流电动机在技术上更容易满足上述要求,所以 20 世纪以来,在需要可逆、可调速与高性能的电气传动技术领域,相当

长的时期内几乎都是采用直流电气传动系统。虽然这期间,人们曾对异步电动机的调速方法进行了持久而详细的研究,希望能够找到一种有效的方法取代复杂且昂贵的直流电气传动系统,但由于条件的限制,并没有取得太大的进展。

由于直流电动机具有电刷和机械换向器,存在着自身的弱点,必须经常进行维修检查,使用环境也受到限制(如不能用于易燃易爆场合),并且限制了直流电动机向高转速、高电压、大容量方向发展,加之世界范围内的能源短缺,人们又开始了新一轮的交流调速传动的研究热潮。自 60 年代以后,随着电力电子学、微电子技术和现代电机控制理论的发展,为交流电气传动产品的开发创造了有利条件,使得交流传动逐步具备了宽调速范围、高稳速精度、快速动态响应及四象限运行等良好的技术性能,并实现了交流调速装置的产品系列化,取代直流电动机调速传动已是必然的发展趋势。

交流电气传动又由同步电动机传动和异步电动机传动两大部分组成。由于同步电动机的转速是由定子电流频率和极对数决定的,电动机在固定频率下将恒速运转,当负载转矩加到同步电动机轴上时,几乎是瞬时便建立起相应的拖动转矩,以维持电动机的稳定运行。又由于在同步电动机中,磁场采用直流励磁,因此允许电动机在任何功率因数下工作,可超前,可滞后,或等于 1,所以最初的同步电动机只用于拖动恒速负载或用于改善功率因数的场合。在恒定频率下运行的大型同步电动机又存在着容易发生失步和振荡的危险,以及起动困难等问题,因此,在没有变频电源的情况下,很难想象对同步电动机的转速进行控制。

从本世纪 30 年代的后期,人们开始研究同步电动机的调速问题。检测转子磁极的位置,以适当的顺序控制与电枢线圈相连的闸流管的导通,代替直流电动机的换向和电刷的功能。在那个时期可以得到的闸流管(即热阴极充气放电管)是难以适应变流器工作的,因此,由变流器供电的同步电动机传动系统未曾得到足够的重视。自从有了半导体固态变流器后,逐渐升频起动完全可以取代过去的一套起动装置,是一种很好的起动方法;自控式调频则从根本

上解决了振荡、失步问题。因此,同步电动机变频调速的应用范围越来越广阔,同步电动机调速控制的研究才有了长足的进步。

1969年BBC公司研制成功世界上第一台6400kW交-交变频同步电动机传动装置,用作法国伦伯尔水泥厂水泥球磨机无级调速传动。70年代初,随着交流电机矢量控制理论的产生及其应用技术的推广,世界各大电气公司都投入大量人力、物力对交-交变频同步电动机传动进行研究,期望这一技术可以应用于高性能要求的轧机主传动及矿井提升机传动。1981年西门子公司研制成功世界上第一台4220kW交-交变频同步电动机矢量控制系统,用于矿井提升机主传动,同年该公司又研制成功第一台4000kW初轧机交-交变频同步电动机传动系统,使大容量交流调速系统登上了高性能调速的舞台,标志着这一技术的成熟。

迄今为止,世界上已有100多套轧机及矿井提升机传动采用了交-交变频同步电动机调速系统,另外,用于拖动高炉鼓风机、空压机以及抽水蓄能电站的可逆机组等100多套大型同步电动机,均采用了交-直-交变频器负载换相方式进行变频起动,它们中最大容量达到了403MW。

我国从1985年起引进大容量同步电动机传动装置,有7套大功率交-交变频同步电动机调速系统用于初轧机主传动,6套用于矿井提升机传动,另外在高炉鼓风机、抽水蓄能电站中引进了和同步电动机配套的软起动系统,运行效果良好。目前正在引进和开发全数字同步电动机控制设备。我国部分科研院所也具有了提供2500~5000kW、带矢量控制的高性能交-交变频同步电动机调速设备的能力。永磁同步电动机伺服系统在我国也已有系列产品。

1.1.2 调速用同步电动机的几种类型

1. 有刷励磁的同步电动机 它是最常见的一种,容量均比较大。转子直流励磁电流可由静止励磁装置通过集电环和电刷送到绕组中,由于电刷和集电环的存在,增加了检修维护的工作量,并限制了电动机在恶劣环境下的使用。

2. 无刷可调励磁的同步电动机 这种同步电动机容量也比较

大,其结构原理如图 1-1 所示。在同步电动机轴上安装一台交流发电机作为励磁电源,经过固定在轴上的整流器变换成直流电供给同步电动机的励磁绕组。这样就无需集电环和电刷,励磁电流的调节可以通过控制交流励磁机定子上的磁场来实现。因此,这种同步电动机维护简单,可用于防爆等特殊场合。我国引进的化工设备中,同步电动机均采用无刷励磁。

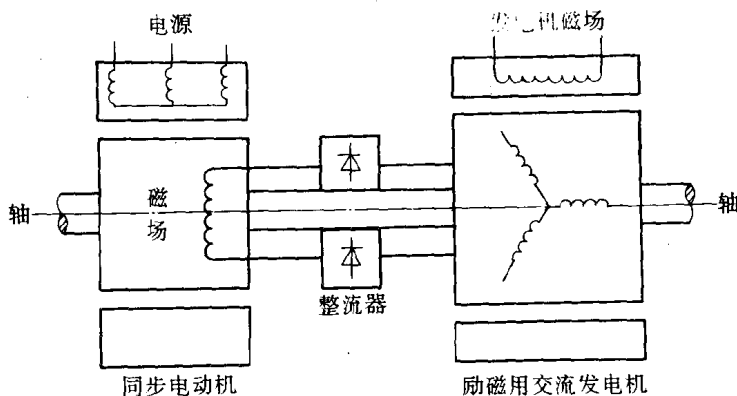


图 1-1 无刷励磁同步电动机原理图

3. 永久磁铁励磁的同步电动机 此种电动机转子采用稀土永磁材料励磁,如钐钴(SmCo)合金、钕铁硼(NdFeB)合金等,使电动机体积和重量大为减小,结构简单,维护方便,运行可靠,且效率比同容量异步电动机提高 4%~13%,功率因数提高 5%~20%。在千瓦级的伺服系统中,用以取代直流电动机,成为真正的无刷直流电动机。

4. 开关磁阻电动机 它是由反应式步进电动机发展起来的,突破了传统电动机的结构模式和原理。定转子采用双凸结构,转子上没有绕组,定子为集中绕组,虽然转子上多了一个位置检测器,但总体上比笼型异步电动机简单、坚固和便宜,更重要的是它的绕组电流不是交流,而是直流脉冲,因此变流器不但造价低,而且可靠性也高得多。其不足之处是低速时转矩脉动较大。目前国内外已有开关磁阻电动机调速系统的系列产品,单机容量可达 200kW