

交流同步电机 调速系统 (第二版)

Adjusting Speed System of Synchronous Machine

李崇坚◎著

内 容 简 介

本书阐述了交流同步电机调速的原理,推导了同步电机的数学模型,介绍了电力电子功率变换器的原理,分析了交交变频器及三电平 PWM 交直变频器的特性、交流同步电机的磁场定向控制原理及系统组成、同步电机直接转矩控制原理及系统、永磁同步电机和直线同步电机调速控制原理与方法、负载换流交直交变频调速同步电机的原理与系统,以及变频调速同步电机设计与参数影响,并给出了大功率交流同步电机调速的工程应用实例。

本书可作为从事电力电子及电气传动技术研究与应用的高等院校教师及研究生的参考书,也可供相关科研机构和生产厂矿的科研人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

交流同步电机调速系统/李崇坚著. —2 版. —北京:科学出版社,2013.2

ISBN 978-7-03-036561-3

I. ①交… II. ①李… III. ①交流电机-同步电机-调速 IV. ①TM341

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 017958 号

责任编辑:余 江 李岚峰/责任校对:刘小梅

责任印制:闫 磊/封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 3 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2013 年 2 月第 二 版 印张:31 1/2

2013 年 2 月第一次印刷 字数:615 000

定价:79.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

现代电气传动控制的发展趋势之一是开发新型的交流调速和伺服系统，一般的交流调速系统多采用异步电动机，自从数字控制的变频调速技术获得成熟应用以后，同步电动机的变频调速或变频软起动也开始崭露头角。无论是小功率的永磁同步电动机和开关磁阻电动机，还是大功率的电励磁或永磁同步电动机，在调速系统中都表现出突出的优势。但是，在一般的技术书籍中，讨论同步电动机调速系统的内容还比较少，本书的问世恰逢其时，可以满足读者的迫切需要。本书侧重于大功率的同步电机调速，涵盖了同步电机数学模型、大功率电力电子变换、磁场定向控制、直接转矩控制、负载换流、变频调速等原理与系统实现，还涉及永磁同步电机和直线同步电机的调速系统，对同步电机调速在轧钢机、矿井提升机、磁悬浮列车等方面的工程应用都有专门的论述，是一本既有理论价值又切合实际应用的专著。

李崇坚博士师从前清华大学校长、电机学与电力系统专家高景德院士，对交流电机理论造诣很深，又长期从事大功率交流调速技术的研究和工程实践，主持或参与了国内外很多重要的工程建设，有丰富的实践经验。因此本书既具深厚的理论基础，又有宽广的实际内容，理论和实际密切结合是本书的突出特色。我深信，本书出版后，对我国电气传动自动化领域的科学研究、研究生培养、工程设计和工业生产都将产生良好的影响。

上海大学教授，博士生导师
中国电力电子学会副理事长



2005年7月16日

第二版前言

本书是有关交流同步电机调速理论和工程实践的一本专著。本书第一版自2006年出版以来,受到国内外学者和工程技术人员的关注。近几年来,随着电力电子器件、变频技术和自动控制技术的进步,交流同步电机调速系统得到迅速发展,新理论和新技术不断涌现,交流变频同步电机调速传动除在冶金、矿山等传统工业传动系统中应用外,国家重点工程的油气输送压缩机传动、船舶电力推进、机车牵引等大型调速传动装备也采用交流同步电机调速系统。特别是随着新能源技术的发展,交流同步电机变频调速已应用于风力发电、抽水蓄能等领域。

第二版根据交流同步电机调速技术的发展,对第一版重新改写,增加一些最新发展的技术,减少部分已过时的技术内容;突出内容的连贯性、逻辑性和物理概念;同时,改正第一版写作和出版中存在的错误。

第二版保持第一版的章节次序。第3章电力电子变换器,减少了晶闸管交交变频器的内容,增加了采用IGBT/IGCT器件的大功率交直交变频器电路拓扑、PWM控制等内容。第4章交流同步电机的磁场定向控制原理与特性,比较了直流电机、异步电机、同步电机控制原理的异同,突出同步电机磁场定向控制原理的物理概念。第5章交流同步电机的磁场定向控制系统,增加了“同步电机无速度传感器控制系统”一节。第7章大功率永磁同步电机调速系统,在分析和讨论永磁同步电机磁场定向控制原理及特性的基础上,增加了永磁同步电机调速系统在风力发电中的应用。第9章负载换流同步电机调速系统,增加了该类电机调速系统工程设计的内容。第11章交流同步电机调速系统的工程应用,针对大功率同步电机常用的交交变频调速、交直交变频调速,讨论了工程设计原理与方法,介绍了交流同步电机变频调速系统在轧钢机、矿井提升机、油气输送领域的应用实例。

在第二版的写作过程中,作者要特别感谢赵晓坦对本书的写作、文字校对所做的大量工作及其付出的辛勤劳动;同时,还要感谢读者对本书提出的宝贵意见和建议,感谢他们对本书的关心和支持。

在第二版写作完成之时,作者仍深感书的内容总赶不上技术的发展,感到自己精力有限、功力不足,同时本书的写作过程断断续续,因此第二版仍可能存在不少错误,希望能得到读者的谅解。衷心希望本书对交流同步电机调速技术的发展和推广应用有所贡献。

李崇坚

2012年8月

第一版前言

随着电力电子学、微电子技术以及现代控制理论的迅速发展,在大功率调速传动领域已出现交流传动取代直流传动的趋势。对于大容量生产机械,如轧钢机、矿井提升机、船舶推进以及牵引传动,交流变频同步电机调速传动不仅具有与直流传动同样优越的调速性能,还具有过载能力大、效率高、体积小、重量轻、转动惯量小、维护简单和可靠性高等优点。同步电机与异步电机变频调速相比较,又具有功率因数高、变频器容量小、弱磁区转矩特性好等特点。

由于交流变频同步电机调速传动具有上述优点,国内外工业界在大容量调速传动中已陆续采用并推广这一技术。冶金行业轧机主传动已普遍采用交流变频同步电机调速传动,并取得了明显的经济效益。煤炭与有色金属行业也将该系统用于矿井提升机传动。国家重点发展的油气输送压缩机调速传动、船舶电力推进、高速磁悬浮直线电机牵引供电等大型调速传动装备也采用交流变频同步电机调速传动。

我国从 20 世纪 70 年代开始进行交流同步电机调速技术的研究,80 年代初已研制成功交交变频同步电机的实验样机,但大功率交交变频调速装置直到 90 年代才得到长足的发展。国家非常重视大型传动装备的国产化,国家“七五”、“八五”、“九五”计划均把大型传动交流调速国产化列入重大技术装备科技攻关项目。国家科委“火炬计划”、国家自然科学基金项目、国家重点基础研究“攀登计划”等项目都对该技术的研究给予了支持。

近 20 年来,我国高等学校、科研院所、电机制造厂对大型交流同步电机调速技术的研究、装备制造和工程应用也做出了很多努力并取得了突出成果。

在理论研究方面,建立并完善了交交变频同步电机调速系统设计与运行理论、交交变频同步电机阻尼绕组理论、交交变频同步电机设计理论、同步电机磁场定向控制理论、大功率交流电机与电网一体化控制理论、交流调速系统仿真理论及平台、交交变频同步电机调速系统工程调整理论与方法、大型交流调速传动机电振荡理论与抑制方法等,在国内外学术界具有重要影响,并为大功率交流调速装备制造和工程应用奠定了基础。

1993 年,我国科研院所把交流调速的科研成果推向工程实践,研制成功我国第一台 2500kW 交交变频同步电机轧机主传动系统。在此基础上,又连续突破了 5000kW 单机大容量、单机可逆、双机传动等技术难关,在大型轧机主传动中

应用成功。特别是近期在国家“九五国家重大技术装备攻关计划”的支持下,研制成功由 8 台 $10\text{MV} \cdot \text{A}$ 大功率交交变频器组成的我国第一套大型热连轧机交流同步电机调速系统。2001 年研制成功我国第一台 6MW 矿井提升机交交变频同步电机传动系统。2002 年采用新型电力电子器件 IGCT 研制成功国家 863 计划项目—— $5\text{MV} \cdot \text{A}$ 三电平大功率变频器,打破了我国大型交流传动装备长期依赖进口的局面,标志着我国交流调速理论研究、装备制造、工程设计与调试技术达到世界先进水平。

交流变频同步电机传动系统由于其容量大、系统庞杂,一般高校不具备该系统的实验装置,因此理论研究及实验较少涉及这一课题。推动这一技术发展的多为大电气公司的研究开发部门,而其研究成果除公布一般结果以外,理论与系统的诀窍多是保密的,关于交流变频同步电机传动系统理论分析与研究的著作和论文较少。

作者长期从事交流变频同步电机调速技术的研究,承担国家重大基础性研究“攀登计划”、国家自然科学基金、国家 863 计划、国家重大技术攻关等许多项目。20 年来,直接参与并主持了我国第一台交交变频同步电机调速系统、第一套大型热连轧机交流调速系统、第一台矿井提升机交流调速系统等重大科研项目。在大功率交流调速理论和工程技术领域逐渐形成自己的特点,在国内外学术界和工程界具有重要影响。本书是作者在搜集和整理该领域国内外大量工程应用实例和最新研究成果的基础上,结合作者及其科研团队多年理论与实践经验写作而成,是大型交流同步电机调速技术领域的一本科学专著。相关科研项目研究得到了国家自然科学基金委员会“国家杰出青年科学基金”(NO. 59625713)的资助。全书共分 11 章,适用的读者为从事电力电子及电气传动技术与应用的高等院校教师及研究生、科研机构和生产厂矿的科研人员。

第 1 章为绪论。主要介绍交流同步电机调速系统的特点、电力电子功率变换器的发展、交流电机调速控制理论、大型交流同步电机调速系统的研究现状与发展。

第 2 章为交流同步电机的数学模型。推导出交流同步电机的基本数学模型、由坐标变换建立交流同步电机 $dq0$ 轴系及 MT 轴系的数学模型、交流同步电机的参数与等值电路。

第 3 章为电力电子功率变换器。首先介绍电力电子器件的原理,分别对大型交流同步电机调速系统常用的交交变频器和三电平 PWM 交直交变频器的基本原理、数学模型、输入与输出特性等进行分析和讨论。

第 4 章为交流同步电机磁场定向控制原理。介绍交流同步电机磁场定向控制的基本原理,分别推导出转子激磁磁链定向控制、气隙磁链定向控制、定子磁链定向控制、阻尼磁链定向控制的数学模型;讨论磁场定向控制同步电机的稳态及

动态特性。

第5章为交流同步电机磁场定向控制系统。介绍磁场定向控制系统的基本结构,分析和讨论构成交流同步电机磁场定向控制系统的基本单元,包括坐标变换系统、位置检测系统、定子电流模型、电流及电压模型磁链观测器、磁链及速度控制系统等。

第6章为交流同步电机的直接转矩控制。首先介绍直接转矩控制的原理,推导出直接转矩控制交流同步电机的数学模型,还讨论了交流同步电机直接转矩控制系统的构成。

第7章为大功率永磁同步电机调速系统。推导出永磁同步电机的数学模型,分析和讨论永磁同步电机磁场定向控制原理及特性,介绍了大型船舶电力推进的永磁同步电机调速系统。

第8章为大功率直线同步电机调速系统。介绍了直线同步电机的原理,推导出磁场定向控制直线同步电机的数学模型,介绍高速磁悬浮列车牵引的直线同步电机调速系统。

第9章为负载换流同步电机调速系统。介绍负载换流同步电机的基本原理,推导出负载换流同步电机的数学模型,分析讨论负载换流同步电机控制系统的原理与构成,还介绍了大型同步电机软起动采用负载换流同步电机调速系统的工程实例。

第10章为交流变频调速同步电机。讨论交流变频调速同步电机频率、极数、电压以及参数等的设计特点,分析研究阻尼绕组对交流变频调速同步电机特性的影响。

第11章为交流同步电机调速系统工程应用。介绍交流同步电机调速系统最常见的交交变频调速、三电平交直交变频调速的工程设计原理与方法,并给出交流同步电机变频调速的应用特点和实例。

十年前,作者在恩师高景德先生和李发海先生的鼓励下开始本书的写作,由于作者能力有限,同时迫于科研与工程的压力,本书写作断断续续,始终没有完成。其间科学技术飞速发展,科研成果不断涌现,使写作难度进一步加大。本书的写作经历了一个漫长的过程,也是一个不断学习、不断总结、不断创新的过程。本书是作者给高景德先生和李发海先生的一份迟交的作业,感谢他们对作者多年的培养和教诲。同时要感谢冶金自动化研究院的张志豪先生、陈自勉先生、丁蕴石先生、朱兆年先生等对作者的培养和帮助,特别要对冶金自动化研究院交流调速工程开发中心的干永革、李向欣、王征、朱春毅等全体同仁十多年来对中国交流调速技术的研究和工程应用,历尽艰辛、不懈努力做出的突出贡献,表示深深的敬意和衷心的感谢。同时感谢李耀华博士、王长江博士、韦立祥博士、王文硕士等清华大学众多学者对本书涉及的理论和技术做出的贡献,作者还要对博士生赵晓坦、

王成胜, 以及硕士生王云鹏、段巍等在本书写作过程中所做的资料整理、文章编写、图文打印等大量工作, 表示感谢。

由于水平有限, 书中内容难免存在错误和不当之处, 作者深感不安和歉意, 敬请有关专家和各位读者给予批评指正。

李崇坚

2005 年 3 月于北京

目 录

序

第二版前言

第一版前言

第 1 章 绪论	1
1.1 交流同步电机的类型	2
1.2 交流同步电机与直流电机调速的比较	3
1.3 同步电机与异步电机调速的比较	4
1.4 大功率电力电子变换器	6
1.5 同步电机调速控制系统	9
第 2 章 交流同步电机的数学模型	12
2.1 交流同步电机的基本数学模型.....	13
2.2 坐标变换.....	18
2.3 同步电机 dq0 轴系的数学模型	23
2.4 多相同步电机的数学模型.....	29
2.5 同步电机的矢量图.....	36
2.6 同步电机的动态参数.....	39
2.7 同步电机 $\alpha\beta 0$ 轴系的数学模型.....	46
2.8 同步电机 MT 轴系的数学模型	49
第 3 章 电力电子变换器	57
3.1 电力电子器件.....	58
3.2 大功率变频器.....	61
3.3 交交变频器.....	86
3.4 PWM 交直交变频器	102
第 4 章 交流同步电机的磁场定向控制原理与特性	127
4.1 直流电机的转矩控制	127
4.2 交流异步电机的磁场定向控制	128
4.3 交流同步电机的磁场定向控制原理	137
4.4 交流同步电机的不同磁场定向控制	150
4.5 磁场定向控制同步电机的稳态特性	173
4.6 磁场定向控制同步电机的动态特性	191

第 5 章 交流同步电机的磁场定向控制系统	199
5.1 概述	199
5.2 坐标变换单元	206
5.3 位置检测单元	209
5.4 MT 轴定子电流模型	217
5.5 磁链观测器—电流模型 MI 单元	225
5.6 磁链观测器—电压模型 MU 单元	234
5.7 电压前馈 UMO 单元	240
5.8 电流控制系统	244
5.9 磁链控制系统	254
5.10 速度控制系统	256
5.11 同步电机无速度传感器控制系统	259
第 6 章 交流同步电机的直接转矩控制	270
6.1 直接转矩控制的基本原理	270
6.2 交流同步电机直接转矩控制的数学模型	272
6.3 直接转矩控制的电压空间矢量	275
6.4 定子磁链轨迹	277
6.5 电磁转矩控制	279
6.6 电压矢量的选择	280
6.7 转矩观测器模型	282
6.8 定子磁链观测器模型	282
6.9 交流电机直接转矩控制系统	285
6.10 直接转矩控制系统的运行特性	288
第 7 章 大功率永磁同步电机调速系统	292
7.1 永磁同步电机简介	292
7.2 永磁同步电机的数学模型	294
7.3 永磁同步电机系统的特性	296
7.4 永磁同步电机的磁场定向控制	300
7.5 大功率永磁同步电机调速系统在船舶推进中的应用	315
7.6 大功率永磁同步电机在风力发电中的应用	320
第 8 章 大功率直线同步电机调速系统	328
8.1 长定子直线同步电机	329
8.2 直线同步电机的数学模型	332
8.3 直线同步电机的磁场定向控制	336
8.4 直线同步电机应用于高速磁悬浮列车	338

8.5 磁悬浮列车试验线供电系统	340
第9章 负载换流同步电机调速系统	348
9.1 负载换流同步电机的基本原理	348
9.2 负载换流同步电机的数学模型	352
9.3 负载换流同步电机的基本关系	359
9.4 负载换流同步电机的调速控制	366
9.5 负载换流同步电机调速系统的设计	373
9.6 负载换流同步电机调速系统的应用实例	382
第10章 交流变频调速同步电机	387
10.1 交流同步电机的结构	387
10.2 同步电机极数与频率的选择	388
10.3 同步电机电压	392
10.4 同步电机的设计性能比较	394
10.5 同步电机的参数	399
10.6 变频调速同步电机阻尼绕组的研究	401
第11章 交流同步电机调速系统的工程应用	418
11.1 交交变频调速系统的工程设计	418
11.2 交直交 PWM 变频调速系统的工程设计	430
11.3 交流同步电机调速系统在轧钢传动中的应用	456
11.4 交流同步电机调速在矿井提升传动中的工程应用	473
11.5 交流同步电机调速在油气输送工程中的应用	481
参考文献	486

第 1 章 绪 论

1890 年美国西屋电气公司利用尼古拉·特斯拉的专利研制出第一台交流同步电机。此后的 100 多年,交流同步电机以其效率高、功率因数高且可以调速等优点,在工业生产机械传动特别是大功率传动中广泛应用。

同步电机的转速是由定子电流频率和转子极对数决定的。同步电机在电网固定频率供电条件下作恒速运行,其转子将以定子旋转磁场的转速同步旋转,故称为同步电机。传统同步电机的转子绕组采用直流激磁。在同步电机恒速运行时,调节转子激磁电流即可调节同步电机的功率因数,功率因数可超前或滞后,也可以等于 1。传统同步电机的转速是恒定不可调的,只用于拖动恒速负载及改善功率因数的场合。在恒定频率下运行的大型同步电机存在着启动困难、运行过程易发生失步和振荡的问题,很难想象对同步电机的转速进行控制。

随着科学技术的发展和生产工艺技术的进步,越来越多的电气传动采用调速技术。直流电机调速性能好且方便,因而在要求调速的传动中一直占统治地位。但是由于直流电机存在换向器、电刷、升高片等部件,使其在单机大容量、高过载能力、低转动惯量以及维护简单化等方面受到了限制,已不能满足生产机械高性能、大型化的发展趋势。随着电力电子学、微电子技术以及现代控制理论的迅速发展,在大功率调速传动领域出现了交流传动取代直流传动的趋势。

交流传动分为同步电机传动和异步电机传动。交流电机的转速控制大多是通过控制电流频率来实现的。同步电机比异步电机变频调速系统的功率因数高、变频器容量小、电机效率高且转动惯量小,在大功率传动中同步电机调速优势明显。

从 20 世纪 30 年代后期以来,人们就开始研究同步电机的调速问题。通过检测同步电机转子磁极的位置,以适当的顺序控制与电机绕组相连的闸流管导通或关断,代替直流电机的换向器和电刷的功能,形成由变流器供电的自控式同步电机,也称为无换向器电机。自从晶闸管等电力电子器件发明后,同步电机变频调速控制才有了长足的进步。

1969 年 BBC 公司成功研制出世界上第一台 6400kW 交交变频同步电机传动装置,用于法国伦伯尔基水泥厂水泥球磨机无级调速传动。20 世纪 70 年代,随着交流电机磁场定向控制理论的产生及其技术的推广应用,世界各大电气公司都投入大量人力、物力对交流同步电机变频调速传动进行研究,期望将这一技术应用于高性能要求的轧机主传动及矿井提升机传动。1981 年西门子公司成功研制出世界上第一台 4220kW 交交变频同步电机调速系统,用于矿井提升机传动。同年该

公司又成功研制出第一台 4000kW 轧机传动交交变频同步电机调速系统,使大容量交流同步电机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。由于交流同步电机调速比传统的直流电机调速具有单机容量大、体积小、转动惯量小、效率高、节约能源等显著的优点,随着电力电子器件和变频技术的迅速发展,目前国内外钢铁行业的大型轧机、采矿领域的矿井提升机以及水泥球磨机等大型工业机械传动已全面采用交流同步电机调速来取代直流电机调速。

交流同步电机调速广泛应用于大型风机、水泵、压缩机的节能传动。例如,驱动高炉鼓风机的 48MW 大型同步电机采用变频调速控制;抽水蓄能电站运用 30MW 大功率变频调速装置对 300MW 大型同步电机进行启动控制;大型长距离油气输送管道,像我国西气东输大型输气压缩机驱动采用了 20MW,6000r/min 的高速同步电机变频调速传动;美国航天风洞试验机采用了一台 120MW 大型变频调速同步电机驱动,这是目前世界上容量最大的变频调速同步电机。

在现代交通中,交流同步电机调速广泛应用于大型舰船电力推进、机车牵引、电动汽车驱动等领域。目前世界上最大的邮轮“玛丽女王二世(Queen Mary 2)”号,采用两台 44MW 的大型交流变频调速同步电机驱动。高速磁悬浮列车采用直线变频同步电机牵引,该技术已进入商业运行阶段,由大功率交直交变频器供电的直线同步电机所牵引的磁悬浮列车速度可达 500km/h。

近年来,永磁同步电机发展迅速,在大型舰船电力推进方面,永磁同步电机的功率已超过 10MW;新能源领域风力发电采用的直驱永磁同步电机功率达到 5MW。永磁同步电机也广泛应用于先进制造领域的机械和机床伺服传动,交流伺服传动的调速范围已达到 1:100000 以上,其调速、定位和跟踪精度已远远超过直流调速。交流永磁同步电机变频调速还走进千家万户,广泛应用于家用电冰箱、空调机、洗衣机等,形成新一代“变频”家电。交流同步电机调速正在国民经济各个领域发挥越来越重要的作用。

1.1 交流同步电机的类型

交流同步电机主要有以下几种类型:

(1) 转子直流激磁同步电机

转子直流激磁同步电机与传统同步电机相同,是交流同步电机最常见的类型。转子直流激磁电流可由电力电子激磁装置通过集电环和电刷送到绕组中。也可以采用无刷激磁的方式,即在同步电机轴上安装一台交流发电机作为激磁电源,感应交流电经过固定在轴上的整流器变换成直流电供给同步电机的激磁绕组。激磁电流的调节可以通过控制交流激磁发电机的定子磁场来实现。

(2) 永磁同步电机

永磁同步电机的转子一般采用稀土永磁材料做激磁磁极,如钕钴合金、钕铁硼合金等。永久磁铁激磁使电机的体积和重量大为减小,而且永磁同步电机效率高、结构简单、维护方便、运行可靠。

(3) 磁阻同步电机

磁阻同步电机是由反应式同步电机发展而来的,它突破了传统电机的结构模式,定转子采用双凸结构,转子上没有绕组,定子为集中绕组,比异步电机更简单、坚固。目前已有开关磁阻电机调速系统的系列产品,但单机容量还不够大。

(4) 直线同步电机

直线同步电机是一种将电能直接转换成直线运动机械能、不需任何中间转换机构的传动装置。它是 20 世纪下半叶电工领域出现的一项高新技术。直线同步电机具有高速、大推力的特点,适合在军事、交通运输、工业生产输送线等领域做各种横向或垂直运动的电气传动。

1.2 交流同步电机与直流电机调速的比较

交流电机与直流电机相比,具有以下特点:

(1) 单机容量不受限制

众所周知,直流电机由于换向器的换向能力限制了电机的容量和速度,直流电机的极限容量和速度之积约为 $P_N \cdot n_{\max} = 3.0 \times 10^6$ 。例如,热连轧机主传动直流电机功率 $2 \times 5\text{MW}$ ($250/590\text{r/min}$) 已达到极限值。而交流电机单机容量可以突破这一限制,例如功率可达 10MW ($150/450\text{r/min}$),容量和速度之积可达 $P_N \cdot n_{\max} = 4.5 \times 10^6$,为设备提供更大的动力。实际上交流电机可以充分利用电力电子器件的能力来提高供电电压,采用先进的电机冷却方式,变频调速同步电机的单机容量已可以做到 56MW 。

(2) 体积小、重量轻、占地面积小

交流电机由于结构简单、体积小、重量轻,占地面积比直流电机大大减少。直流电机不仅单机体积大,而且为了减少转动惯量,常常采用双电枢或三电枢串联方式,占地面积很大。日本某钢厂采用交交变频同步电机替代了原三电枢直流电机,电机功率同为 11250kW ,但交流电机的占地面积仅为原直流电机的 $1/3$ 。

交流电机由于结构简单、坚固,因此有可能与机械合为一体,形成机电一体化产品,从而大大简化机械结构,减少体积和重量,提高可靠性。例如传统的水泥球磨机采用齿轮传动,采用交交变频同步电机可以取消齿轮直接传动,将同步电机的转子与球磨机滚筒联为一体,实现高效率的无齿轮水泥球磨机传动。矿井提升机采用外转子结构,将钢绳直接绕在电机外转子上,使电机与卷筒合为一体。轧钢地下卷取机传

动采用交流同步电机,将轧钢地下卷取机的卷取芯棒作为同步电机的转子,减少了电机的转动惯量、体积和重量,提高了可靠性。越来越多的交流同步电机紧靠机械或与生产机械融为一体,打破了直流电机安装在主电室中,远离机械的格局。

(3) 转动惯量小

以某钢厂 2050mm 热连轧机为例,直流主传动电机 $2 \times 4500\text{kW}$ (250/578r/min) 双电枢传动,转动惯量为 $76.8\text{t} \cdot \text{m}^2$;而主传动交流同步电机 9000kW (250/578r/min) 单电枢传动,其转动惯量为 $17.2\text{t} \cdot \text{m}^2$,减少为直流电机的 $1/4.5$,使整个传动系统的速度响应时间由 120ms 提高到 70ms,提高了产品质量和产量。

(4) 动态响应好

由于交流电机转动惯量大大减少,并且交流变频同步电机没有换向火花对过载能力的限制,电机可以具有更大的动态加速电流。因此,交流电机较直流电机有更好的动态响应特性。现代热轧和冷轧机都采用了轧板精度和板形自动控制,要求轧机传动的速度控制系统响应达到 60rad/s,而直流电机由于换向火花限制了电机电流变化率 di/dt ,使速度响应仅可达到 15rad/s。表 1-2-1 列出了当前交流调速与直流调速的技术性能比较。

表 1-2-1 交流调速与直流调速的技术性能比较

	直流调速	交流调速
电机电压/V	1200	1500~6000
功率因数	0.7	0.6~1.0
交换器效率	0.98	0.96~0.97
调速范围	0.1%~100%	0~100%
调速精度	$\pm 0.01\%$	$\pm 0.01\%$
速度响应/(rad/s)	15~30	40~100

(5) 维护简单化

交流电机由于无须换向器,所以维护量大大减少。某厚板轧机直流主传动年维修工作量 145h,而采用交流传动后只需 36h,仅为直流传动的 $1/4$ 。

(6) 节约能源

交流同步电机的效率比直流电机提高 2%~3%。以某钢厂 1150 初轧机改造为例,原直流传动电机容量 $2 \times 4500\text{kW}$,功率消耗 $2 \times 343\text{kW}$,冷却水消耗 $2 \times 110\text{m}^3/\text{h}$;而采用交流传动后,电机容量增大到 $2 \times 5000\text{kW}$,功率消耗仅 $2 \times 186.7\text{kW}$,功率损耗减少 46%,冷却水消耗为 $2 \times 59\text{m}^3/\text{h}$,仅为原直流电机的 54%。采用交流传动后,每吨钢电耗节约 15%以上,而产量则提高 30%以上。

1.3 同步电机与异步电机调速的比较

交流调速可以采用同步电机也可以采用异步电机。同步电机与异步电机各有

其特点,近 20 年来,世界各国电气公司和学术界对此争论不休。但进入 20 世纪 90 年代,对于大容量交流电机调速,世界各国已基本趋向于同步电机。表 1-3-1 列出了同步电机与异步电机有关数据的比较。

表 1-3-1 同步电机与异步电机的比较

	异步电机	同步电机
额定功率 P_N/kW	6000	6000
转速 $n/(\text{r/min})$	60/120	60/120
电机功率因数 $\cos\varphi$	0.89	1.0
效率 η	0.939	0.955
相对转动惯量	134%	100%
相对定子重量	116%	100%
相对转子重量	109%	100%
磁通变化时间常数/ms	3.05	0.355
相对变频器容量	354%	258%
相对激磁功率	0	10%
电网输入功率因数 $\cos\varphi$	0.67	0.85

(1) 可靠性与维护量

异步电机的转子结构非常简单,它没有滑环和激磁绕组,因此对于笼形异步电机的维护只限于轴承。而同步电机则在其滑环上有少量的维护量,不过与直流电机换向器相比,它的维护量要少得多。现代同步电机电刷的寿命在 1.5 万小时左右。尤其是近年来轧机主传动普遍采用隐极式同步电机,其转子坚固性与笼形电机相近。因此,同步电机的维护量与异步电机基本相同。

(2) 功率因数

同步电机由于独立的转子激磁调节控制,可使其定子功率因数保持为 1,即 $\cos\varphi=1$ 。而异步电机则完全不同,电机的激磁功率必须通过定子侧获得,因此,定子电流始终是滞后的,其功率因数一般在 0.8 左右。为了改善异步电机的功率因数,可以降低电机的磁通密度,但这受到电机的材料设计限制;另一种提高功率因数的方法是降低漏抗,但这样又增加了电流的谐波,会进一步恶化功率因数。显然,异步电机功率因数低是一个很难克服的缺陷。

(3) 变频器容量

由于异步电机的激磁能量是从定子侧供给的,同时异步电机功率因数低于同步电机,视在功率高于同步电机,故异步电机调速的变换器容量比同步电机大 30%左右。

(4) 电机尺寸和转动惯量

由于异步电机的定子电流由磁化电流和有功电流两部分组成,因此,异步电机的定子必须具有较大的视在功率。为了提高其功率因数,异步电机尽可能将电机气隙减少,但减少气隙要求电机制造工艺具有更高的加工精度,而细长结构的挠度也限制了气隙的减少,使大功率变频调速异步电机的设计和制作更加困难。所以,异步电机常常设计成较大的定子和转子铁心直径,电机结构短粗。由于同步电机激磁从转子提供,其气隙可以较大,制造相对容易,因此同步电机可以设计成细长结构,且长度和直径之比可以优化设计。同步电机的体积 D^2L (直径平方与长度的乘积) 要比异步电机小得多。由表 1-3-1 可见,异步电机的转动惯量和尺寸要比同步电机大。

(5) 控制精度

在异步电机的磁场定向控制系统中,磁通控制取决于转子电阻参数,而该电阻随温度变化。为了消除这一影响,必须进行转子参数辨识控制,该课题一直是国内学者科研攻关的难题。而同步电机激磁电流是单独控制的,电机磁通不随温度变化,故转矩控制精度高。

(6) 弱磁比

根据异步电机原理,异步电机弱磁恒功率运行时,其最大转矩 M_{emax} 随电机频率的增加呈二次方减少, $M_{\text{emax}} = \frac{M_{\text{emaxN}}}{(f_{\text{max}}/f_{\text{N}})^2}$ 。其中, M_{emaxN} 为额定频率时的最大转矩, f_{N} 为额定频率, f_{max} 为最高频率。当电机弱磁比达到 3, 即最高频率是额定频率 3 倍, $f_{\text{max}} = 3f_{\text{N}}$ 时, 异步电机的最大转矩为额定最大转矩的 1/9, 即 $M_{\text{emax}} = M_{\text{emaxN}}/9$ 。由此可见, 对于弱磁比超过 2.5 的卷取机、冷连轧机等传动, 异步电机必须采取增加容量或提高电压的方法来提高弱磁时的最大转矩。显然, 在这种场合, 同步电机要优越于异步电机。

1.4 大功率电力电子变换器

现代电机调速技术的基础是电力电子技术。电力电子元器件正向着大功率、高电压、集成化、智能化方向发展。传统的晶闸管元件正逐步让位于新型可关断电力半导体器件。近几年出现的集成门极换向晶闸管(IGCT)达到 6kA/6kV, 已取代门极可关断晶闸管(GTO)成为大功率高压变频器的主流器件。场控器件绝缘栅双极晶体管(IGBT)在中小功率交流调速中普遍应用。1kA/6.5kV 的 IGBT 以及 4kA/4.5kV 的另一种场控器件——注入增强型绝缘栅晶体管(IEGT)研制成功, 并开始应用于大功率高压变频器。此外, 将微电子集成电路与电力电子器件组合形成的功率集成电路(Power IC)、智能功率模块(IPM)、功率电力电子集成模块