

电气自动化新技术丛书

大功率交—交变频 交流调速及矢量控制

马小亮 著

机械工业出版社

TM 34

M

电气自动化新技术丛书

大功率交-交变频 交流调速及矢量控制

马小亮 著



机械工业出版社

(京)新登字054号

大功率交-交变频交流调速和矢量控制技术是本世纪70~80年代发展起来的新技术,正在逐步取代传统的大功率直流调速。

本书基于作者从事这方面工作的体会,详细地介绍了这两项技术的原理、主电路和控制电路,以及它们的设计计算方法。在叙述原理时,力求从物理概念出发,避免用过多的抽象数学推导,阅读本书需有晶闸管可逆直流调速的基础知识。

本书可作为高等院校电气自动化类的教师、研究生、高年级学生以及这个领域中的工程技术人员和研究人员的参考书,也可作为制造和使用该类设备的单位对技术人员和工人进行培训的教材。

电气自动化新技术丛书

大功率交-交变频
交流调速及矢量控制

马小亮 著

责任编辑:孙流芳 版式设计:于扬
封面设计:范培炎 责任校对:杨斌
责任印刷:李连生

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版营业许可证出字第117号)

天津电气传动设计研究所印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经销

开本850×1168 1/32·印张5 3/4·字数144千字

1992年9月北京第一版·1992年9月天津第一次印刷

印数0,001~5,000·定价:6.00元

ISBN-111-93397-3/TM·423(X)

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、推动人类社会向前发展,具有极其重要的意义。电气自动化技术既是多种学科的交叉综合,又是全面提高国民经济水平的有力手段。在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天,电气自动化技术日新月异。毫无疑问,电气自动化技术必将在建设“四化”,实现到2000年使国民生产总值比1980年翻两番的宏伟目标中发挥重要的作用。

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共同成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会,组织有关专家撰写和陆续出版《电气自动化新技术丛书》。

本《丛书》有如下特色:

一、《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,并适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际,结合应用阐述理论,重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容由浅入深,条理清晰,语言通俗,文笔流畅,便于自学。

《丛书》的读者将以工程技术人员为主,但《丛书》也可作为科研人员及高等学校自动化类专业教师、研究生和本科高年级学生的参考书。

编写出版《电气自动化新技术丛书》，对于我们是一种尝试，肯定会存在不少问题和缺点，希广大读者给予支持和协助，並欢迎大家批评与指正。来函请寄：**300180天津市津塘公路 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：夏德铃

副主任委员：喻士林 沈安俊 陈亚鹏

委员：（按姓氏笔划序）

王 炎 王永珠 许广锡 刘宗富

冷增详 陈伯时 李鹤轩 周国兴

陶近贤 涂 健 夏遂华 黄 俊

韩素琴

秘 书：杨 斌

前 言

大功率交-交变频调速及矢量控制技术是本世纪70~80年代发展起来的新技术,正逐步取代传统的大功率直流调速。我国已引进多套大功率交-交变频调速装置,同时也自行开发这类装置,预计90年代会有较大的发展。

缺少全面介绍该技术的参考书籍和培训教材是推广应用该项技术的障碍之一。许多交流调速的教科书都涉及这两项技术,但过于简单,距实际应用太远;或过于偏重理论,抽象的数学推导太多,使初学者不得要领。本书基于作者从事这方面工作的体会,详细地介绍了这两项技术的原理、主电路和控制电路,以及它们的设计计算方法,力求从物理概念出发,避免用过多的抽象数学推导。

本书第一章概述交-交变频调速的特点、应用范围、使用的电机及发展历史。第二至三章介绍交-交变频器的原理、对电网的影响、主电路设计及控制方法。第四至七章介绍矢量控制原理、同步电动机和异步电动机的矢量控制系统及调节器计算方法。书中所用的素材部分来自公开发行的书刊和学术会议文集,请参阅书后的参考文献;另一部分来自外国公司的技术资料 and 培训教材,无法列入参考文献,请读者谅解。

本书的对象是高等院校电气自动化类的教师、研究生和高年级学生;该领域中的研究设计人员、技术人员及技术工人。本书既可作为参考书,也可作为技术培训的教材。阅读本书需有晶闸管可逆直流传动的基础知识。

初稿完成后,蒙上海工业大学陈伯时教授主审,提出了许多宝贵的修改和补充意见,特此表示感谢。在本书的选题、编写、审稿和出版过程中,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天津电气传动设计研究所的领导和同事们给予了许多支持和帮助，没有这些支持和帮助，本书是不可能面世的，作者对此深表谢意，限于篇幅，难以全部列出他们的姓名，敬请谅解。

由于水平所限，书中定有不少谬误和欠妥之处，衷心希望读者批评指正。

作者

1991年4月

目 录

电气自动化新技术丛书序言

前 言

第一章	概述	1
§ 1-1	交流调速传动和直流调速传动	1
§ 1-2	交-交变频调速传动的应用范围	5
§ 1-3	交-交变频调速传动用电动机	8
§ 1-4	交-交变频调速传动发展概况	10
第二章	交-交变频器基础	12
§ 2-1	单相输出交-交变频器原理	12
§ 2-2	三相输出交-交变频器原理	13
§ 2-3	交-交变频器输出频率上限	17
§ 2-4	交-交变频器电网侧输入功率因数	20
一、	功率因数定义	20
二、	可控整流装置的功率因数	21
三、	单相输出交-交变频的输入功率因数	21
四、	三相输出交-交变频的输入功率因数	22
五、	接有容性负载的交-交变频器的输入功率因数	25
§ 2-5	交-交变频器电网侧输入电流谐波	26
一、	直流传动用可控整流器的输入电流谐波	26
二、	单相输出交-交变频器的输入电流谐波	28
三、	三相输出交-交变频器的输入电流谐波	29
§ 2-6	交-交变频器的无功补偿及谐波吸收	30
一、	补偿电容器	30
二、	无源谐波吸收及静补装置	33
三、	有源滤波吸收装置	35
§ 2-7	交-交变频器主回路参数计算	36
一、	整流变流器计算	36

二、晶闸管电压、电流计算.....	38
第三章 交-交变频器的控制	42
§ 3-1 电压控制型交-交变频器的控制.....	42
一、余弦交点法.....	42
二、错位无环流法.....	44
§ 3-2 电流控制型单相输出交-交变频器的控制.....	45
一、电流调节及电压前馈补偿.....	45
二、电流断续补偿.....	47
三、 $\alpha_{\max}$ 及 $\alpha_{\min}$ 的限制.....	49
四、零电流检测.....	51
五、无环流换向逻辑.....	52
§ 3-3 电流控制型三相输出交-交变频器的控制.....	55
一、三相电流调节.....	55
二、交流偏置.....	56
第四章 交流电动机矢量控制基础.....	60
§ 4-1 电动机统一控制理论	60
一、调速的关键是转矩控制.....	60
二、统一的电动机转矩公式.....	61
§ 4-2 直流电动机的控制	63
§ 4-3 交流电动机矢量控制基本概念	64
§ 4-4 交流电动机的坐标系及符号规定	66
一、交流电动机的坐标系.....	66
二、符号规定.....	67
§ 4-5 交流电动机的空间矢量概念	69
§ 4-6 坐标变换及矢量分析	73
一、坐标变换.....	73
二、矢量分析器(VA)	75
§ 4-7 永磁同步电动机按转子位置定向的矢量 控制原理	77
§ 4-8 普通同步电动机按磁通定向的矢量控制	

原理	80
§ 4-9 异步电动机按磁通定向的矢量控制原理	84
§ 4-10 在矢量控制系统中电动机的加减速和正 反转	94
第五章 普通同步电动机按磁通定向的矢量控制 系统	97
§ 5-1 变频器的电流控制系统	97
§ 5-2 同步电动机的电流模型	98
一、定子、励磁(转子)、磁化及阻尼电流矢量	99
二、电流模型	102
§ 5-3 同步电动机的电压模型	105
§ 5-4 磁链调节及弱磁控制	110
§ 5-5 同步电动机的转子位置测量	112
§ 5-6 同步电动机功率因数控制	115
§ 5-7 电动机速度控制	119
§ 5-8 同步电动机矢量控制系统框图	121
第六章 异步电动机按磁通定向的矢量控制系统	124
§ 6-1 异步电动机与同步电动机的矢量控制系 统的比较	124
§ 6-2 异步电动机按磁通定向的矢量控制系统	126
一、磁链开环的异步电动机矢量控制系统	126
二、磁链闭环的异步电动机矢量控制系统	126
三、磁链开环和闭环复合的异步电动机矢量控 制系统	128
§ 6-3 无测速发电机和码盘的简易异步电动机 矢量控制系统	132
第七章 电动机工作点及调节器参数计算	136
§ 7-1 变量的测量值、相对值和模型值	136
§ 7-2 电动机工作点计算	139
一、同步电动机工作点计算	139

二、异步电动机工作点计算.....	142
§ 7-3 调节器参数计算.....	145
一、交流电流调节器计算.....	146
二、直流电流调节器计算.....	148
三、转子励磁电流调节器计算.....	149
四、磁链调节器计算.....	151
附录	
附录A Dillingen Huettnerwerke 公司轧板厂 交-交变频传动调查.....	156
附录B 异步电动机等效电路.....	158
附录C 电子最佳调节器设计.....	160
附录D 调节器参数计算补充说明.....	161
参考文献.....	172

第一章 概 述

交流电动机比直流电动机结构简单, 成本低, 维护方便, 但由于变频装置昂贵及交流调速性能差, 长期以来在调速领域里一直是直流传动占统治地位。近年来, 随着电力电子技术的发展, 情况有了变化, 与直流调速相比, 交流调速用变频装置增加的成本已被采用交流电动机而节约的成本所补偿, 采用矢量控制后, 交流调速的性能也能做到和直流一样, 因此在许多直流调速的世袭领域里出现了以交流调速取代直流调速的趋势。交-交变频传动(Cycloconverter-fed Drive)是一种在大功率(500kW以上或1000kW以上)低速(600r/min以下)范围内广泛采用的交流调速方案, 正在轧机、矿山卷扬、船舶推进、水泥、风洞等传动中逐步取代传统的大功率直流调速, 取得了良好的技术经济效益。本书介绍交-交变频调速和矢量控制的原理、控制及计算方法。本章介绍一般情况: 交、直流调速比较, 交-交变频调速的应用范围, 所用电机的特点以及发展概况。

§ 1-1 交流调速传动和直流调速传动

直流调速控制简单, 调速性能好, 变流装置(晶闸管整流装置)容量小, 长期以来在调速传动中一直占统治地位, 但也具有下述缺点:

(1) 直流电动机结构复杂, 成本高、故障多、维护困难, 经常因火花大而影响生产。

(2) 换向器的换向能力限制了电机的容量和速度。直流电动机的极限容量和速度之积约为 $10^6 \text{ kW} \cdot \text{r/min}$, 许多大型机械的传动电动机已接近或超过该值, 设计制造困难, 甚至根本造不出来。

(3) 为改善换向能力, 要求电枢漏感小, 转子短粗, 导致 $G\dot{D}^2$ 增大, 影响系统动态性能, 在动态性能要求高的场合, 不得不采用双电枢或三电枢, 带来造价高、占地面积大、易共振等一系列问题。

(4) 直流电动机除励磁外, 全部输入功率都通过换向器流入电枢, 电机效率低, 由于转子散热条件差, 冷却费用高。

交流电动机没有上述缺点, 但调速困难。近年来, 随着电力电子技术的发展, 大功率交流调速的性能已达到直流传动的水平, 装置成本降低到与直流传动相当或略低的程度, 由于维修费用及能耗大大降低, 可靠性提高, 因此出现了以交流传动取代直流传动的强烈趋势。采用这项技术能取得下述效果:

(1) 减小维修工作量, 减少停机时间, 提高产量。以德国 Dillingen 厂 5.5m 厚板轧机为例, 直流主传动年维修工作量 145h, 交流主传动只需 36h, 仅为直流传动时的 1/4。

(2) 可以突破直流电动机的功率、速度极限, 为设备提供更大的动力, 从而提高产量。仍以 5.5m 厚板轧机为例, 直流传动的最大功率为 $2 \times 8000 \text{ kW}$ (50/100r/min) 已达极限值。改成交流传动后, 主电动机功率提高 36%, 达 $2 \times 10920 \text{ kW}$ (58.5/112.5r/min)。

(3) 减小电机的转动惯量。以宝钢 2050mm 热连轧机为例, 直流主传动电动机 $2 \times 4500 \text{ kW}$ (250/578r/min) 双电枢, 转动惯量为 $19.2 \text{ t} \cdot \text{m}^2$; 交流主传动电动机 9000 kW (250/578r/min) 单电枢, 转动惯量为 $4.3 \text{ t} \cdot \text{m}^2$, 减小为直流时的 1/4.5, 使速度响应时间由 120ms 减小到 80ms, 有利于提高产品产量和质量, 单电枢电动机比双电枢电动机节约厂房和基础面积。

(4) 节能、节水。仍以宝钢 2050mm 热连轧机电机为例, 每台交流主传动电动机比直流电动机减少损耗和冷却水约 50%, 如果 7 个机架主传动全用交流电动机, 按轧制时间 5400h/a 计算, 年节电 1149 万 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 节水 196.5 m^3 。

(5) 由于交流电动机结构简单, 因此有可能与机械合为一

体，形成机电一体化产品，大大简化机械结构，减小体积和重量，提高可靠性。例如无齿轮水泥球磨机(电动机转子与球磨机滚筒联为一体)和外转子矿井卷扬机(电动机的外转子外面直接绕钢丝绳，使电动机和卷筒合为一体)等，参见图1-1和1-2。

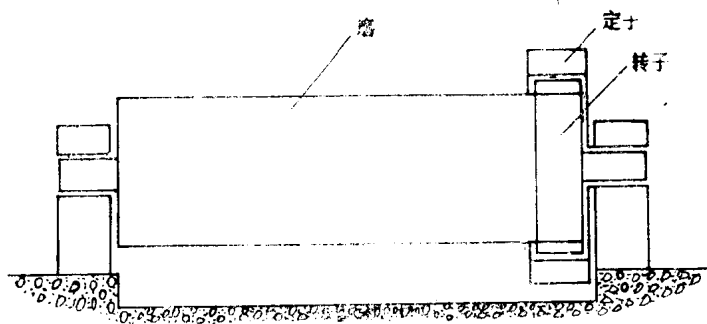


图1-1 无齿轮水泥球磨机

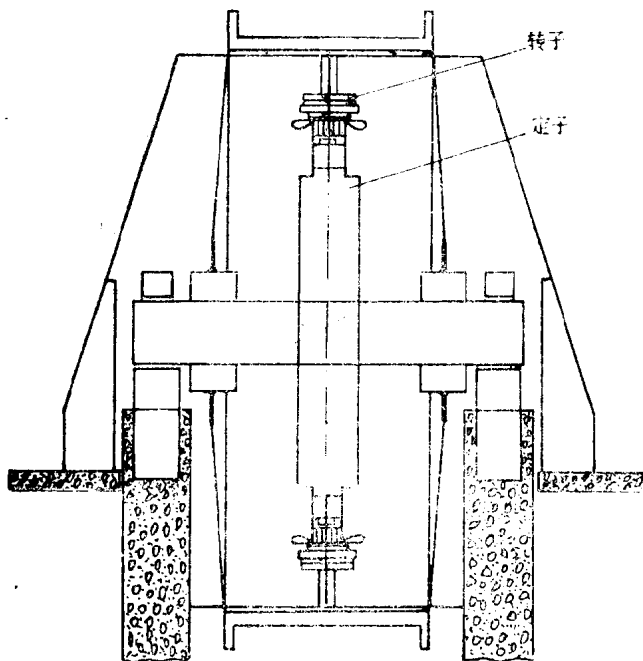


图1-2 外转子矿井卷扬机

(6) 成本方面, 交流调速的功率装置(变频器与电网补偿装置)和控制装置比直流调速的功率装置(整流器与补偿装置)和控制装置贵, 但它的电动机便宜。控制装置、功率装置及电动机三部分在总调速装置成本中所占比例大致是:

	直流调速	交流调速
控制装置	5%	10%
功率装置	40%	60%
电动机	55%	30%

随着电动机功率的增加, 交流调速总成本的增长比直流调速总成本的增长要慢, 大于某一功率后交流调速就比直流调速便宜, 这临界功率值各公司看法不同, 目前一般认为是 2000~3000kW, 但Siemens公司认为是1000kW。若直流电动机的 GD^2 不能满足工艺要求, 需采用双电枢或三电枢时, 交流调速比直流调速要便宜许多, 以宝钢2050mm热连轧机报价资料为例, 如果精轧7个机架都采用交流主传动, 可节约300万马克。

为了更直观地比较交、直流两种电动机, 在表1-1和1-2中列出了两种轧钢主传动电动机的数据。

表1-1 5.5m厚板轧机主传动电动机

轧 机	日本大分钢厂(1976年)	德国Dillingen厂(1984年) ^①
电动机类型	直流电动机	同步电动机
功率(kW)	2×8000(单辊传动)	2×10920(单辊传动)
最大功率(kW)	2×16525	2×26530
转速(r/min)	50~100	58.5~112.5
电压(V)	500	3~1750(11.25Hz)
效率(%)	92.7	97.0
总损耗(kW) (主回路, 励磁, 通风)	2×889	2×570
冷却水(m³/h)	2×96	2×62
转子直径(m)	3.5	2.9
$GD^2(\times 10^4 \text{N} \cdot \text{m}^2)$	89	79

①参见附录A。

表1-2 2050mm热连轧机主传动电动机

电动机类型	直流电动机	同步电动机
功率(kW)	2×4500(双电枢)	9300(单电枢)
最大过载(%)	200	200
转速(r/min)	250~578	250~578
电压(V)	1184	3~1650 (19.26Hz)
效率(%)	95	98.1
总损耗(kW) (主回路, 励磁, 通风)	2×310	316
冷却水(m³/h)	107	55
$GD^2(\times 10^4 \text{N} \cdot \text{m}^2)$	19.2	4.3

§ 1-2 交-交变频调速传动的应用范围

交流调速用的变频器种类很多, 按使用的电力电子器件及其关断方式分为如下三类:

(1) 自关断类 使用全控型电力电子器件(既能控制开通, 也能控制关断), 例如大功率晶体管(GTR), 可关断晶闸管(GTO)、功率场效应晶体管(Power MOSFET)、绝缘门极晶体管(IGBT)等。

(2) 强制关断类 使用半控型电力电子器件——普通晶闸管(仅能控制开通, 不能控制关断), 靠换相电容的充放电来关断已导通器件。

(3) 自然换相类 使用半控型电力电子器件——普通晶闸管, 利用电源或负载的交流电压来关断已导通器件。

自关断类受器件限制, 目前功率还不能做得很大, ③强制关断类功率受换相电容的换相能力限制, 对于大功率变频器来说, 只有自然换相类适用, 因为普通晶闸管功率大, 价格便宜, 自然换相工作可靠。

③近年来GTO装置发展很快, 功率已达兆瓦级。