

高等学校教材

交流调速系统

北京科技大学 周绍英 储方杰 主编

机械工业出版社

本书介绍感应式异步电动机一般变频调速的原理、变频器的分类、转速开环的变频调速系统及其数学模型、转差频率控制和矢量控制的变频调速系统,脉宽调制型变频调速系统、无换向器电动机调速系统、串级调速系统,以及其他交流调速方式和交流调速系统的数字化内容。同时还编入了变频器的选择与应用实例及交流调速系统的计算机辅助分析两部分实用内容。

本书特点是宽、深、新相结合,涉及到交流电动机的各种调速方式,对性能优异的变频调速方式进行了深入研究,又编入了交流调速数字化的新内容;注意理论与实际及科技发展的现状密切结合,并便于自学。

本书可作为工业自动化专业和机电工程专业的大学本科及专科教材,也可作为有关工程技术人员参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

交流调速系统/周缉英,储方杰主编. —北京:机械工业出版社

1996.11

ISBN 7-111-05236-6

I. 交… I. 周… II. 交流电动机传动-调速-控制系统

N. TM921.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 08579 号

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:王海峰 版式设计:李松山 责任校对:丁然

封面设计:郭景云 责任印制:丁然

昌平北七家印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1996 年 9 月第 1 版·1996 年 9 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16 印数·0001—4000 册 印张·9³/₄ 字数·230 千字

定价:11.00 元

前 言

交流调速和直流调速是传动领域的两大分支,是工业自动化专业的重要专业课。为适应自动化事业发展的需要,我校在10多年教学与科研工作基础上,分别编写了《直流调速系统》和《交流调速系统》。《交流调速系统》基于原校内讲义,并吸收同类教材的特点,同时考虑到科学技术发展的近况,使教材具有如下特点:

(1) 宽、深、新结合 涉及交流电动机的各种调速方式,深入研究了性能优异的变频调速方式,又有反映交流调速发展的“数字化”新内容。

(2) 针对性与实用性强 针对大学本科要求,针对交流调速系统及单元介绍,又有变频器的选择与应用实例及交流调速系统计算机辅助分析两部分实用性内容。

(3) 理论与实际及科学技术发展现状密切结合 在多次修改讲稿基础上,写出校内讲义,又根据教学和科研成果及目前科技发展情况,进行修改与补充,具有自己的特色。例如,随着新型开关器件及大功率器件的发展,将研究重点从主回路元件的换流和多重化技术,移至控制系统、单元介绍及数字化内容。

(4) 适用性广,便于自学 编写时注意了通用性,因此适于各种行业、部门使用。内容深入浅出,便于自学,多学时与少学时均可适用。

本书可作为工业自动化专业、机电工程专业大学本科及专科教材,也是从事这方面工作的工程技术人员的一本很有价值的参考书。

本书除绪论外,共有七章内容。绪论中综合了国内近年来的会议及文献资料,内容比较丰富。第一章异步电动机的一般变频调速系统,是篇幅最大的一章,其内容有一般变频调速的控制方式及机械特性;变频器的分类及工作原理;转速开环的变频调速系统及其数学模型;转差频率控制的变频调速系统和矢量控制的变频调速系统。第二章脉宽调制型变频调速系统,介绍常用的脉宽调制方式、变幅和恒幅脉宽调制的变频调速系统。第三章无换向器电动机及其调速系统,主要介绍无换向器电动机的基本原理、基本特性及其闭环控制系统,并简要介绍同步电动机变频调速的其他方式。第四章绕线转子异步电动机串级调速系统。第五章交流调速系统的数字化。第六章其他交流调速方式综述。第七章交流调速的实用技术,介绍变频器的选择与应用实例及交流调速系统的计算机辅助分析。建议授课时,以绪论和前四章为重点内容,第五、六章可视学时多少及学生层次自定是否讲授。

绪论、第四章由周绍英编写;第一章、第二章由钱力行编写,周绍英补充修订;第三章由储方杰编写;第五章由冶全部自动化研究院干永革编写;第六章由周绍英和唐山大学郭建波编写;第七章第一节由周绍英、储方杰编写,第二节由首钢工学院严周南编写。由周绍英教授、储方杰副教授担任主编。

本书由首钢工学院严周南教授和北方工业大学李喜田教授担任主审,他们对全书进行了认真审阅,并提出了很多宝贵意见。书中全部图表由谭泽阳用计算机绘制。在书的出版过程中得到谭志豪老师的大力帮助,对保证书的质量和加速书的出版起了积极的作用。在此一并表示衷心感谢。

在编写过程中，参阅了很多同类书籍和资料，并吸收了其中某些精华部分，为此向同行专家教授致谢。

由于编者水平有限，书中不免存在缺点和问题，敬请读者批评指正。

编者

1996年5月

常用符号表

一、元件和装置的文字符号（按国标 GB7159—87）

A 放大器	ROM 只读存储器
ACR 电流调节器	RP 电位器
ASR 速度调节器	T 变压器
AVR 电压调节器	TA 电流互感器
AΦR 磁通调节器	TG 测速发电机
A/D 模/数转换器	TI 逆变变压器
BQ 位置检测器	TV 电压互感器
C 电容器	U 变流器
FU 熔断器	UI 逆变器
K 接触器、继电器	UR 整流器
K/P 直角坐标/极坐标变换器	VD 二极管
L 电抗器	VT 晶体管、晶闸管
M 电动机	VR 矢量旋转变换器
MS 同步电动机	U/f 电压频率变换器
R, r 电阻器	VST 稳压管
RAM 随机存储器	3/2 三相/二相变换器

二、物理量的文字符号

C_E, C_s 异步电动机电势系数	P_r 转差功率
C_M 异步电动机转矩系数	Q 无功功率
D 调速范围	S 视在功率
E, e 反电动势, 感应电动势	s 转差率
F 磁动势	S, p 微分算子, d/dt
f 频率	T 时间常数, 开关周期, 转矩, t 时间
GD^2 飞轮矩	T_m 机电时间常数, 最大转矩
I, i 电流, 反馈电流	T_l, T_L 电磁时间常数
K 控制系统各环节放大倍数	U, u 电压, 反馈电压
k 变比, 电压比, 变压比	U_x 变量 x 的反馈电压
L 自感	U_x^* 变量 x 的给定电压
L_M 互感	ΔU 偏差电压
N 匝数、载波比	$W(s)$ 传递函数
n 转速	X 电抗
n_0 理想空载转速, 同步转速	Z 阻抗
p 极对数	α 转速反馈系数, 变流装置控制角
P, p 功率、有功功率	β 电流反馈系数, 变流装置逆变角
P_e 电磁功率	γ 电压反馈系数, 换流超前角

γ_0 空载换流超前角
 δ 脉冲宽度, 换流裕量角
 η 效率
 θ 电角位移
 θ_1 空间角位移
 λ 电动机允许过载倍数
 μ 换流重叠角

ρ 占空比, 电位器分压比
 τ 积分时间常数
 Φ 磁通
 φ 相位角、阻抗角
 Ω 机械角速度
 ω 电角速度、角频率
 Ψ, ψ 磁链

三、常用下角标

a 电枢
 c 参考信号, 载频信号
 D, d 整流
 ex, out 输出
 f 正向, 磁场
 i 逆变
 in 输入
 L 负载
 m 励磁, 峰值, 机械

max 最大值
 min 最小值
 n 额定值
 Q 起动
 r 转子, 反向
 s 转差
 0 空载
 1 定子, 一次侧
 2 转子, 二次侧

目 录

前言		四、系统中主要单元的原理及实现电路	35
绪论	1	五、异步电动机的动态数学模型及矢量变换控制方程式	41
第一章 异步电动机的一般变频调速系统	6	六、磁通观测器	46
第一节 异步电动机一般变频调速的控制方式及机械特性	6	思考题	47
一、保持 U_1/f_1 = 常数的控制方式	6	第二章 脉宽调制型变频调速系统	49
二、保持 E_1/f_1 = 常数的控制方式	7	第一节 脉宽调制方式	49
三、恒功率控制方式	7	一、简单的多脉冲调制法	49
四、恒流控制方式	7	二、正弦波脉宽调制法	50
五、机械特性	8	三、准正弦波脉宽调制法	55
第二节 变频器的分类及工作原理	9	四、电流跟踪控制 PWM	55
一、变频器的工作原理	9	五、“ Δ ”脉宽调制法	56
二、电压型变频器和电流型变频器	10	六、消除特定谐波法	57
三、180°导通型变频器和 120°导通型变频器	11	七、谐波效应最小法	59
第三节 转速开环的变频调速系统	14	八、脉宽调制方法的发展趋势	59
一、交-直-交电压型逆变器的频率开环调速系统	14	第二节 变幅脉宽调制的变频调速系统	59
二、交-直-交电流型逆变器的频率开环调速系统	20	一、正弦波脉宽调制变频调速系统	59
三、交-交变频器的频率开环调速系统	22	二、同步调制的正弦波脉宽调制系统	62
四、应注意的问题	23	三、PWM 逆变器转差频率控制系统	63
第四节 转速开环变频调速系统的数学模型	24	第三节 恒幅脉宽调制的变频调速系统	65
一、交-直-交电压型逆变器变频调速系统的数学模型	24	一、恒幅电压脉宽调制的变频调速系统	65
二、交-直-交电流型逆变器变频调速系统的数学模型	26	二、恒幅电流脉宽调制的变频调速系统	67
第五节 异步电动机转差频率控制系统	27	思考题	67
一、转差频率控制的基本原理	27	第三章 无换向器电动机及其调速系统	68
二、异步电动机转差频率控制的变频调速系统	29	第一节 概述	68
三、转差频率控制变频调速系统存在的问题	31	一、什么是无换向器电动机	68
第六节 矢量控制的变频调速系统	32	二、无换向器电动机的种类	69
一、直流电动机和异步电动机转矩控制的差异	32	第二节 无换向器电动机的基本原理	70
二、矢量控制的基本思路	33	一、电路构成	70
三、矢量变换控制的变频调速系统原理框图	34	二、直流电动机原理简介	70
		三、无换向器电动机工作情况分析	71
		四、无换向器电动机的换流问题	72
		五、分配器	75
		第三节 无换向器电动机的基本特性	77
		一、无换向器电动机的调速特性和转矩特性	77
		二、换流超前角 γ 及换流重叠角 μ	78
		三、无换向器电动机的功率因数	80
		第四节 无换向器电动机的起动问题	81

一、问题的产生	81
二、电流断续起动方式	81
第五节 无换向器电动机的四象限运行	82
第六节 无换向器电动机的闭环控制系统	83
一、无换向器电动机的数学模型	83
二、控制系统的构成	83
三、改善特性的方法	84
第七节 交流式无换向器电动机	85
一、系统构成	85
二、晶闸管的导通顺序	85
三、电源换流和负载换流	86
第八节 同步电动机变频调速的其他形式	87
一、频率开环的同步电动机变频调速系统	87
二、采用交-交电压型变频器的同步电动机变频调速系统	87
思考题	88
第四章 绕线转子异步电动机串级调速系统	89
第一节 串级调速的原理及分类	89
一、串级调速原理	89
二、串级调速的分类	90
第二节 串级调速系统的机械特性	91
一、三相桥式整流器的工作状态	91
二、转子整流电路的电动势和电流	93
三、转矩特性	94
四、机械特性	95
五、机械特性分析	96
第三节 串级调速系统的效率和功率因数	97
一、串级调速系统的总效率	97
二、串级调速系统的总功率因数	98
第四节 串级调速的闭环控制系统	100
一、双闭环系统的组成	100
二、系统的动态结构图	100
第五节 超同步串级调速系统	102
一、转子交-直-交变频方式的超同步串级调速	102
二、转子交-交变频方式的超同步串级调速	104
第六节 串级调速系统的几个特殊问题	104
一、串级调速系统的功率因数改善措施	104
二、起动方式的选择	105
三、异步电动机容量的选择	106
思考题	106
第五章 交流调速系统的数字化	107

第一节 概述	107
一、交流调速系统数字化的发展历史	107
二、交流调速系统数字化的意义和作用	108
第二节 小型全数字化交流调速系统	110
一、系统结构	110
二、以主单片机为核心的信号处理	110
三、以从单片机为核心的脉宽调制器	112
四、主从单片机之间的通信	114
五、系统保护	115
第三节 大型全数字化交流调速系统	115
一、LOGIDYN D 系统介绍	115
二、交-交变频同步电动机矢量控制系统的构成	116
三、软件结构	117
思考题	119
第六章 其他交流调速方式综述	120
第一节 变极调速	120
一、变极原理	120
二、三相绕组的联结方式	121
三、容许输出功率和转矩	122
四、机械特性	123
五、变极调速的应用及注意问题	124
第二节 调压调速	125
一、开环调压调速特性及调速性能	125
二、调压调速闭环控制系统	126
第三节 滑差电机调速	127
一、电磁转差离合器的工作原理	127
二、机械特性	128
三、调速性能	129
第四节 转子串电阻调速	130
思考题	130
第七章 交流调速的实用技术	132
第一节 变频器的选择与应用实例	132
一、变频器的选择	132
二、使用变频器时应注意的问题	133
三、应用实例	135
第二节 交流调速系统的计算机辅助分析	137
一、概述	137
二、CAAAD 中主要环节的数学模型	138
三、CAAAD 应用举例	140
附录 变频器规格一览表	141
参考文献	146

绪 论

一、直流电机固有的问题和交流调速的优势

直流电动机转矩容易控制。在晶闸管-电动机系统中,额定转速以上调节电动机磁场;额定转速以下调节电动机电枢电压;另外,采用转速、电流双闭环系统,可以得到良好的动、静态特性。所以很长时期内在调速领域占据首位。但是由于直流电动机本身有机机械换向器,给直流调速系统造成一些固有的、难于解决的问题。而交流调速系统刚好能够克服这些固有问题,下面进行具体分析对比。

(1) 结构、维修和运行效率 直流电动机有机机械换向器,而且除励磁外,全部输入功率从换向器流入电枢,电动机效率低,转子散热条件差,冷却费用高。交流电动机结构坚固,易于维护,维修费用低,运行效率高。例如德国某厚板轧钢机,采用直流调速时,年维修 145h;采用交流调速后,只用 36h,为直流传动的 1/4。宁夏某钢铁厂将一台 3—4/550 直进式拉丝机改为笼型异步电动机变频调速,据现场统计,运行效率从 65% 提高到 90%,几乎不用维修,年节约维修费和电费 10 万元。

(2) 容量、转速、电压 直流电动机向高电压、高转速、大容量发展困难,最高电压为 1kV;交流电动机很容易达到 6kV、10kV。由此在相同的电流下,交流电动机的容量大大增加。直流电动机的极限容量和速度乘积为 $10^6 \text{kW} \cdot \text{r/min}$,交流电动机则为 $200 \times 10^6 \sim 400 \times 10^6 \text{kW} \cdot \text{r/min}$ 。

(3) 体积、价格、惯性 直流电动机单位功率指标为 50N/kW,而笼型异步电动机为 40~15N/kW,因此体积、价格大大低于直流电动机,而且 GD^2 小。为改善直流电动机的换向能力,要求电枢漏感小,转子短粗,导致 GD^2 增大,影响系统动态性能,需采用双电枢,使价格提高,占地大,易共振。例如某厂热连轧机,主传动采用直流电动机 $2 \times 4500 \text{kW}$,双电枢, GD^2 为 $19.2 \times 10^4 \text{N} \cdot \text{m}^2$,而采用交流电动机 9000kW,单电枢, GD^2 为 $4.3 \times 10^4 \text{N} \cdot \text{m}^2$,减少到直流时的 1/4.5,转速响应时间由 120ms 降至 80ms。

(4) 总成本对比 交流调速的功率装置(变频器和电网补偿装置)和控制装置价格贵,但电动机价格便宜,三者在总装置成本中所占比例大致为:

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

由此看出,由于交流调速控制装置和功率装置在总成本中所占比重较大,在电动机容量小时,交流电动机比直流电动机成本低的因素不明显,但随着电动机功率的增加,交流调速总成本的增加将比直流调速总成本增长慢。大于某一功率后,交流调速将比直流调速成本低。目前一般认为其临界功率是 2000~3000kW。

如果直流电动机的 GD^2 不能满足要求,需要采用双电枢或三电枢时,交流调速比直流调

速成本要低更多。

二、发展交流调速势在必行

1. 从节能观点看

我国工业生产能耗高，能源也紧张，节能是急待解决的问题。我国发电总量中，大约有60%是电动机消耗掉的，因此电技术节能是非常重要的课题。

(1) 风机、水泵节能 风机、水泵是应用面最广、耗电量大的生产机械。全国风机、水泵类总装机容量在3000万台以上，耗电量约占发电量的38%，占全国工业用电的40%~45%，是个用电大户。而且我国风机平均运行效率为50%，水泵为41%，用挡板调节流量浪费相当严重。由于风量 Q 与转速 n 成正比，功率 P 与 n^3 成正比，当需要一半风量时，将电动机转速降低50%，输出功率只有13%，节能相当可观。可见对这个用电大户发展速度控制是节能的有效途径。

(2) 工业锅炉节能 工业锅炉耗煤占煤产量的1/3以上，耗电也相当严重。若将锅炉鼓风机所用恒速电动机改为调速电动机，可以节电30%~38%。

(3) 空调机节能 空调机在工业、民用各个领域的应用日趋增多，发展自动调温的空调机，既利国又利民。

(4) 新型供水装置节能 用变频器和压力传感器实现上水压力闭环控制，代替体积大、耗电多的气压罐，可使设备造价平均少10%，建筑面积少80%，节电30%以上。

2. 提高产品质量和产量

例如某卷烟厂的5.5~7.5kW交流电动机采用无级调速后，使产品质量产量提高，一天就可以回收19台变频器的成本。前述的拉丝机电控系统采用变频调速，用可编程控制器实现过程控制后，钢丝断头率下降，停机时间减少，年新增产值173万元，钢丝质量得到提高。

3. 交通运输系统的交流化

由于普通燃油汽车对环境造成污染，各发达国家都在竞相开发电动汽车，而且电力机车正由直流调速向交流调速发展，采用可关断晶闸管(GTO)元件，脉冲宽度调制(PWM)控制方式，车速可达270km/h，充电一次可行数百公里。采用直线同步电动机驱动的磁悬浮列车也正在发展中。

4. 五六十年代的设备更新换代

由交、直流调速装置对比看出，可以采用笼型异步电动机变频调速代替直流双闭环系统。若采用同步电动机变频调速，还可以改善电网的功率因数。对大型设备进行总体价格对比，交流调速更显出其优越性。

三、国内外交流调速发展情况

正因为交流电动机能够克服直流电动机固有的缺点，所以人们一直想以交流调速代替直流调速，30年代就有人提出有关理论。到60年代，随着电力电子技术的发展，交流调速得以迅速发展。日本在1975年直流调速占80%，交流调速占20%；到1985年其比例刚好相反。美、日的加工机械主轴传动系统已全部实现交流化。80年代后5年，世界交流调速传动的年平均增长率为13%~14%；直流传动年平均增长率只有3%~4%。

世界工业发达国家交流调速的发展与应用，经历了风机、水泵→初轧机→连轧机的过程。1987年日本川崎钢铁公司水岛钢厂投入使用的2号带钢冷连轧机，是世界上第一套采用矢量控制的交-交变频器、全数字控制的带钢冷连轧机，从此结束了冷连轧机只能采用直流调速的

历史,到目前为止,已有四套这类系统在亚洲、北美投产。西门子公司和法国 GEC 公司将交-交变频调速应用于热连轧机主传动,也证实大容量的交流调速系统达到并超过了直流调速性能,标志着交流调速代替直流调速的巨大成功。至今世界上已有 100 多套轧钢机和矿井提升机采用了交-交变频同步电动机调速,功率达到兆瓦级。

新型电力电子器件的发展促进了交流调速的发展和更新换代。60 年代第一代电力电子器件是半控的晶闸管,调速系统的主回路比较复杂,造价也高。70 年代研制出第二代电力电子器件 GTO、GTR,和功率场效应管 (MOSFET) 等。进入 90 年代, MOS 控制元件和智能控制元件又把电力电子器件推向第三代,其中绝缘门极双极型晶闸管 (IGBT) 兼有 MOSFET 的高输入阻抗和 GTR 的低通压降两方面的优点。这些全控器件的应用使主回路大大简化,体积减小,成本降低。智能功率集成模块将开关器件、驱动电路、保护电路集成在一个模块上。一个模块实现多功能,使变频器向小型化、低噪声、高性能、高可靠性、低成本方向发展。例如日本富士变频器已发展到 9 型,体积不断减小, G7 系列加上制动单元,体积只有同容量 5 型的一半, G7S 系列采用 32 位数字信号处理器 DSP,响应速度比 5 型快 50 倍。

开关元件频率提高, IGBT 工作频率可达 20kHz, MOSFET 可达 100kHz,更有利于采用各种 PWM 方式控制,但是使开关损耗增加。为解决此问题,又推出谐振式逆变器,使开关元件在零电压或零电流时导通和关断,将开关损耗减小到最低程度,并且减小了主回路体积,这也是降低交流调速装置成本的良好途径。

四、国内外交流调速的应用情况

在经济发达国家,交流调速的推广应用速度相当快,已遍布冶金、电力、铁路、运输、化工、民用等各个领域,变频器的名字几乎家喻户晓。

据 BBC 资料,从 1974~1988 年一共提供了 129 套静止变频器,同步电动机最大容量为 300MVA,变频器电压 1.2~13.8kV,功率为 1~30MW。30MW、13.8kV 的静止变频器可以在 1h 内把 18 台 20~40MW 的大型同步电动机起动完。在我国某电站,有目前最大的静止变频器,输出功率为 60MW,既用于起动,又用于调速。

循环变流器供电的交流传动设备国内大约有 11 套,7 套是进口的,两套合作生产,两套是国产的。从 1985 年开始,几乎各大钢铁厂都从国外引进了大功率交流调速设备,用于初轧机和连轧机上,还引进数套同步电动机软起动设备,驱动同步电动机最大容量达 300MW。目前世界上最大的 GTO 逆变设备也在我国,在 12 套逆变器上采用 6000V、6000A 的 GTO 元件。西门子公司生产的 50 多台交-交变频器,最大容量 12700kW,其中 9 套用于我国各大钢厂初轧机主传动上。中小功率变频器,国外各大公司在我国几乎都有代销点,仅南方一家公司每年就销售变频器 8 万~10 万 kW,价值 7000 万~8000 万元。国外的产品不再一一列举。

变频调速是我国重点推广的十大高新技术之一。目前我国生产变频器的企业已有近 50 家,有的变频器技术指标已接近或达到国际水平。例如,成都佳灵电气制造公司采用国际最先进的智能化模块和 IGBT 开关元件制成的变频器,在技术上具有世界一流水平,已被国家科委列入重点成果推广项目。更可喜的是,至今已有三套国产的大功率交流设备投入运行。第一套是天津电气传动设计研究所开发研制的交-交变频设备,用于某钢厂轧钢机主传动电动机驱动,电动机功率为 1250kW,1200V;第二套是冶金部自动化研究院研制的,用于某钢厂 850 轧机 2500kW 同步电动机上;第三套是天津电气传动设计研究所研制的同步电动机软起动设备,用于某钢厂 4.8 万 kW 同步电动机上。这三套装置投入运行,结束了我国大功率交流调速

装置长期依赖进口的历史,交流调速技术达到一个新水平。

五、交流调速发展动向

(1) 主回路 由于新型开关器件的发展,主回路可以向高电压、大容量、小型化方向发展。元件开关频率提高,更便于采用各种 PWM 控制,使变频器输出波形理想化,还可以降低滤波电抗、电容及电路中变压器的体积,同时减少对电网的公害。谐振式逆变器也是发展方向之一。

(2) 控制系统向数字化方向发展 数字化系统克服了模拟控制系统电路功能单一,参数离散性大,控制精度不高的缺点。它的体积小,抗干扰能力强,可靠性高,功耗低,可以实现很多复杂的控制,并增加了控制的灵活性,具有自诊断能力。

80 年代后期,美国 GE 公司、AGE 公司等先后推出全数字化控制系统。我国也引进了具有 90 年代世界先进水平的全数字化变频调速装置,同时把研制大功率全数字化交-交变频装置定为“八五”科技攻关项目。所用的微处理器从 8 位、16 位到 32 位数字信号处理器 DSP。DSP 的运算速度高,效能超出其他计算机的处理器 10~50 倍。

(3) 无速度传感器交流调速系统的研究 国外从 70 年代开始,最初用电动机的电压电流对转速进行估计,后来采用模型参考自适应(MRAS)进行转速辨识,近来卡尔曼滤波器理论被用于电机的参数及转速辨识。

(4) 控制方式 PWM 控制方式需要开关元件工作频率高,在历史上推动了电力电子技术的发展。电力电子器件的高频化,又使 PWM 控制方式的应用更加广泛。它的应用遍及斩波、逆变、整流、变频等各种电路。

矢量控制方式使交流调速控制性能可以和直流调速相媲美,但也有不足之处。定子磁场定向方式正在研究之中。

转矩直接控制是在定子坐标系下,分析交流电动机的数学模型,控制其转矩和磁链,其特点是用空间矢量的分析方法,直接在定子坐标系下计算与控制交流电动机的转矩,采用离散的电压矢量控制,借助于离散的两点式调节,产生 PWM 信号,直接对逆变器的开关状态进行最佳控制,以获得转矩的最佳性能。它省去了复杂的矢量变换、电动机数学模型的简化处理及通常的 PWM 信号发生器,控制思想新颖,控制结构简单,控制手段直接,动、静态性能高。

(5) 现代控制理论在交流调速中的应用 现代控制理论如专家系统、模糊控制、神经网络等在交流调速中的应用,是现在研究的热门课题。它使电力电子系统的控制技术发展到一个崭新的阶段。如果说 80 年代是现代控制理论应用的起步阶段,90 年代则是现代控制理论向高水平发展的时代。

六、交流调速方式的分类、本书重点及课程特点

由 $n = \frac{60f_1}{p} (1-s)$ 可知,异步电动机^①调速方式分为变极调速、变频调速和改变转差率调速三大类。改变转差率调速中,又有调压调速、电磁转差离合器调速、转子串电阻调速和串级调速。

同步电动机的调速方式是变频调速,分为自控式变频调速和他控式变频调速两种。自控

^①本书中异步电动机专指感应电动机,不一定适用于其他类型异步电动机——编辑注。

式变频调速，也就是无换向器电动机及其调速系统。

本书重点研究异步电动机和同步电动机的变频调速，其次介绍串级调速，并对其他调速方式进行简单介绍。同时还介绍交流调速系统的数字化新内容。

交流调速系统的特点类似于直流调速系统，但又有不同之处。它的基础是交流电机、电子技术、自动控制原理、直流调速系统。它是 80 年代新兴的一门边缘学科，是多学科的交叉，几乎涉及到自动化学科的所有课程，是一门理论性、实践性都很强的专业课。

第一章 异步电动机的一般变频调速系统

由 $n_0 = 60f_1/p$ 知, 当极对数 p 不变时, 同步转速 n_0 和电源频率 f_1 成正比。连续地改变供电电源频率, 就可以平滑地调节电动机的转速。这样的调速方法叫变频调速。变频调速具有很好的调速性能, 在交流调速方式中具有重要意义, 应用相当广泛, 是可与直流双闭环系统相竞争的调速方式。

本章对异步电动机变频调速的一般原理、变频器的分类、变频调速的控制方式和机械特性、转速开环的变频调速系统及其数学模型进行全面介绍。由于可关断功率器件的发展, 主回路结构及换流方式大为简化, 所以本章重点研究控制系统及其单元原理。同时介绍转差频率控制系统和矢量控制系统。

第一节 异步电动机一般变频调速的控制方式及机械特性

对于实际的生产机械, 不但要求可以调速, 而且要求有较好的调速性能。连续改变异步电动机的供电频率, 可以平滑地调速, 这时的机械特性将如何改变? 能否满足实际生产机械的要求? 为了满足一定的工艺要求, 变频调速时, 要采用什么控制方式? 这些是本节要研究的问题。

由电机学可知, 异步电动机有如下关系式

$$U_1 \approx E_1 = 4.44f_1 K_{N1} N_1 \Phi_m \quad (1-1)$$

式中, 定子绕组匝数 N_1 、定子绕组系数 K_{N1} 为常数。在电源频率 f_1 一定时, 定子绕组感应电动势 E_1 与产生它的气隙合成磁通 Φ_m 成正比。忽略定子阻抗压降时, 定子电压 U_1 与 E_1 近似相等。由式 (1-1) 看出, 若 U_1 不变, f_1 与 Φ_m 成反比。如果 f_1 下降, 则 Φ_m 增加, 使磁路过饱和, 励磁电流迅速上升, 铁损增加, 电动机效率降低, 也使功率因数减小。如果 f_1 上升, 则 Φ_m 减小, 电磁转矩减小, 电动机的过载能力下降。可见, 在调节 f_1 的同时, 还要协调地控制其他量, 才可以使异步电动机具有较好的性能。一般是在调节 f_1 的同时, 控制 U_1 或定子电流 I_1 。两个被控量的协调关系不同时, 有不同的机械特性。

一、保持 $U_1/f_1 = \text{常数}$ 的控制方式

一般生产机械的负载多为恒转矩负载。对恒转矩负载, 希望在调速过程中保持最大转矩 $T_{\max}$ 不变, 即电动机的过载能力不变。由电机学可知, 最大转矩 $T_{\max}$ 为

$$T_{\max} = \frac{3pU_1^2}{4\pi f_1 [r_1 + \sqrt{r_1^2 + (X_1 + X_2')^2}]} \quad (1-2)$$

式中 X_1 、 X_2' ——定子漏电抗和转子漏电抗的折合值。

若忽略定子电阻 r_1 , 并考虑到 $X_1 + X_2' = X_K = 2\pi f_1 (L_1 + L_2')$, 则 $T_{\max} \propto (U_1/f_1)^2$, 所以在从额定频率 (称为基频) 向下调节 f_1 时, 协调控制 U_1 , 使 f_1 与 U_1 的比值保持不变, 即可保证在调速过程中, 电动机的最大转矩不变。此称为压频比恒定的控制方式。

在频率较高时,定子电阻 r_1 相对于短路电抗 X_K 来说,可以忽略(因为 $X_K \propto f_1$),在调节 f_1 同时,调节 U_1 ,并保持 $U_1/f_1 = \text{常数}$,即可使 $T_{\max}$ 不变。但是在频率较低时, r_1 相对 X_K 来说,不可忽略。此时即使仍保持压频比恒定, Φ_m 也要减小,从而使最大转矩 $T_{\max}$ 减小。电动机低速运行时,过载能力随转速 n 的降低而降低。因此这种控制方式的变频调速只适用于风机类负载,或是能轻载起动,而又要求调速范围较小的场合。

二、保持 $E_1/f_1 = \text{常数}$ 的控制方式

对于要求调速范围大的恒转矩负载,希望在整个调速范围内,保持最大转矩不变,即 Φ_m 不变,由式 (1-1) 看出,可以采用 $E_1/f_1 = \text{常数}$ 的控制方式,也称为恒磁通控制方式。

由于异步电动机的感应电动势 E_1 不好测量和控制,所以在实际应用中,是采取补偿的办法。随着 f_1 的降低,适当提高 U_1 ,以补偿 r_1 上的压降,等效地满足 $E_1/f_1 = \text{常数}$,以达到维持最大转矩不变的目的。下面由图 1-1 看一下补偿情况。图中曲线 1 为 $U_1/f_1 = \text{常数}$ 时的 U_1 与 f_1 的关系曲线;曲线 2 是随 f_1 的降低,逐渐增加补偿量时的 U_1 与 f_1 的关系曲线;曲线 3 所示的补偿情况,除与曲线 2 相同处外,又考虑到低频空载时,由于电阻压降减小,应减少补偿量,否则将使电动机磁通 Φ_m 增大,导致磁路过饱和而带来的问题,故 U_1 与 f_1 的曲线是折线。具体如何选择这一曲线,要根据生产工艺要求而定。

三、恒功率控制方式

电动机在额定转速以上运行时,定子频率将大于额定频率,如按以上控制方式,定子电压则要相应地高于额定电压,这是不允许的。因此在基频以上应采取恒功率控制方式。这与直流电动机在额定转速以上,采用恒压弱磁调速相似。此时,由于定子电压限制在允许范围内,而频率升高,致使气隙磁通减小,转矩减小,但因为转速上升了,所以属恒功率性质。恒功率控制方式所要求的电压频率协调关系,可作如下推导。

$$\text{忽略 } r_1 \text{ 时} \quad T_{\max} \propto \left(\frac{U_1}{f_1}\right)^2 \quad (1-3)$$

$$\text{额定转矩 } T_n \text{ 为} \quad T_n \propto \frac{U_1^2}{\lambda f_1^2} \quad (1-4)$$

式中 λ ——电动机的过载倍数。

同理,对于任意电压 U_1' ,与其对应的频率 f_1' 时,异步电动机的相应转矩为

$$T_n' \propto \frac{U_1'^2}{\lambda f_1'^2} \quad (1-5)$$

要求恒功率调速时,应满足

$$T_n \omega_n = T_n' \omega_n' \text{ 或 } T_n f_1 = T_n' f_1' \quad (1-6)$$

将式 (1-4) 和式 (1-5) 代入式 (1-6),可得

$$\frac{U_1'^2}{f_1'} = \frac{U_1^2}{f_1} \text{ 或 } \frac{U_1'}{\sqrt{f_1'}} = \frac{U_1}{\sqrt{f_1}} \quad (1-7)$$

只要满足 $U_1/\sqrt{f_1} = \text{常数}$ 的条件,即可达到恒功率调速。实际在基频以上调速时,是保持 U_1 为额定值不变,而只升高频率,所以为近似恒功率调速。

四、恒流控制方式

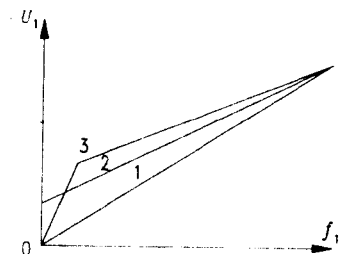


图 1-1 恒磁通变频调速时的补偿特性

在变频调速时,保持异步电动机定子电流 I_1 恒定,叫恒流控制方式。由于恒流控制方式限制了 I_1 ,所以恒流时,最大转矩一般要比异步电动机本身的最大转矩小很多。因此,这种控制方式只适用于负载变化不大的场合。对其机械特性不予研究。

综上所述,一般在基频以下采用 $U_1/f_1 = \text{常数}$ 或 $E_1/f_1 = \text{常数}$ 的控制方式;基频以上采用恒功率控制方式。因此有针对性地研究机械特性。

五、机械特性

由 $n_0 = 60f_1/p$ 知,改变电源频率 f_1 ,就有不同的 n_0 ,从而得到不同的机械特性。若再得知最大转矩的变化规律和机械特性运行段的斜率,即可大致画出变频调速的机械特性。

(1) 最大转矩 当 f_1 从基频向下调,而数值较高时, r_1 可忽略, $T_{\max} \propto U_1/f_1$, 按压频比恒定的控制方式调速,最大转矩基本保持不变。当 f_1 数值较低时, r_1 不可忽略,由式 (1-2) 可见,最大转矩将减小。这是因为在 r_1 上产生的压降使得定子电动势 E_1 进一步降低,气隙磁通 Φ_m 减小,所以,即使保持 $U_1/f_1 = \text{常数}$,也不能保持 Φ_m 不变,致使最大转矩 $T_{\max}$ 减小。 f_1 下降越多, r_1 的影响越大, $T_{\max}$ 减小越多。为了提高低速时电动机的过载能力,必须适当地提高 U_1 , 采用 $E_1/f_1 = \text{常数}$ 的控制方式。当从基频向上调时, U_1 保持额定值不变, f_1 增加, Φ_m 减小, $T_{\max}$ 随之减小。

(2) 运行段的斜率 由电机学知,临界转差率 s_m 为

$$s_m = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (1-8)$$

在 f_1 较高时,忽略 r_1 并用 $X_1 + X_2' = 2\pi f_1 (L_1 + L_2')$ 代入式 (1-8) 中,得

$$s_m = \frac{r_2'}{2\pi f_1 (L_1 + L_2')}$$

又因为转速 $n = n_0 (1-s)$, 所以对应最大转矩时的转速降为

$$\Delta n_m = s_m n_0 = \frac{r_2'}{2\pi f_1 (L_1 + L_2')} \frac{60f_1}{p} = \text{常数}$$

可见 Δn_m 与频率 f_1 无关。因此,无论在基频以下还是基频以上调速时,机械特性都是平行上下移动的。到频率 f_1 很低时, r_1 不可以忽略, Δn_m 减小,机械特性更硬些。根据以上分析,可以定性画出如图 1-2 a 所示的机械特性。

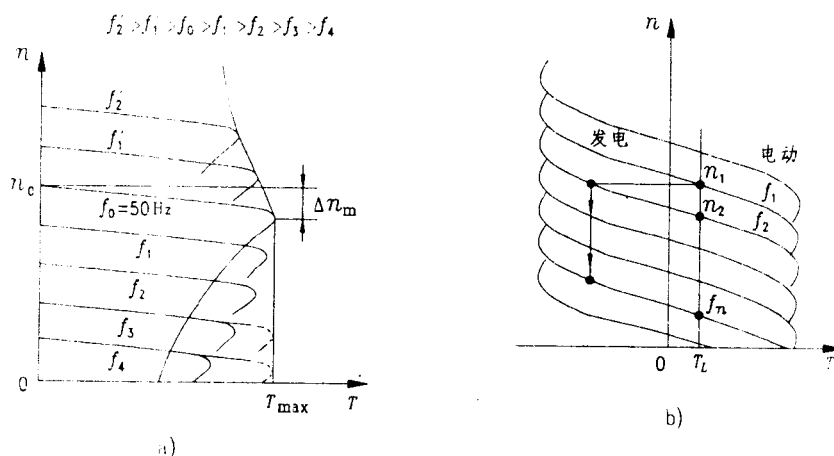


图 1-2 异步电动机变频调速时的机械特性

a) 电动状态 b) 发电状态

当异步电动机在某一频率下运行时,如果将频率迅速降低, n_0 下降的幅度较大,使转差率 s 变负,则可以使电动机过渡到回馈制动状态。此时电动机运行在第二象限。和直流电动机一样,向电网回送电能。在减速过程中,如果始终保持频率比转速 n 下降得快,即 n_0 比 n 下降得快,电动机可以一直在回馈制动状态下运行,如图1-2 b所示。这种减速和停车都是很经济的。

第二节 变频器的分类及工作原理

为了实现异步电动机的变频调速,必须有单独的频率可调的变频电源,给被调速的异步电动机供电。这是变频调速的关键环节。过去采用变频机组,变频机组由直流电动机和同步发电机组成。直流电动机作为同步发电机的原动机,同步发电机的磁场不变,调节直流电动机的转速,就能改变同步发电机的频率,即成为频率可调的变频电源。变频机组虽然能够达到调速的目的,但是装置笨重,占地也大,旋转装置又不易维护,使得变频调速的推广受到限制。实际上,变频机组的作用就是把直流电变为频率可调的交流电,现在已经用静止的变频装置代替,称为变频器。

变频器的任务是把电压和频率恒定的电网电压变成电压和频率可调的交流电。大多数情况下,是将工频(50Hz)交流电转变为电压、频率可调的交流电。这里有两种方式,一是先用整流器将交流电变成直流电,再用逆变器将直流电变为频率可调的交流电。这时变频器是由整流器和逆变器组成。这种变频方式称为间接变频,其所用的变频器称为间接变频器,也叫交-直-交变频器,是变频器中一种主要的结构形式。另一种是把工频交流电直接变成频率可调的交流电。相对前者,它称为直接变频器,也叫交-交变频器,又称为循环变频器。不论是交-直-交变频器还是交-交变频器,根据变频电源的性质,又可分为电压型变频器和电流型变频器。

在交-直-交变频器中,又由于开关器件的导通时间不同,而分为 180° 导通型和 120° 导通型。

一、变频器的工作原理

下面从单相逆变电路看一下频率可调的基本原理。图1-3 a为单向逆变电路,

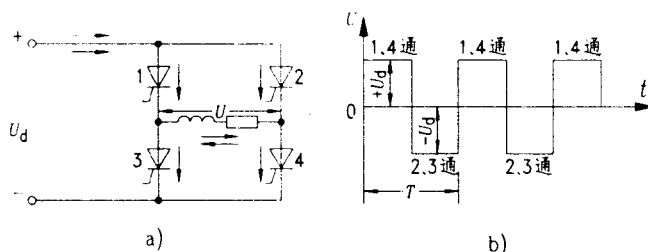


图 1-3 单相逆变电路及其输出波形

a) 电路原理图 b) 波形图

直流电压 U_d 经过由四个晶闸管元件组成的桥式电路,接在负载上(即交流电动机的某一相上),元件1、4和2、3按一定的频率轮流导通时,在负载上即可得到该频率下的方波交流电压,波形如图1-3 b所示。电路中串入电感,可使负载端电压近似成正弦波。控制元件导通和关断