

高等学校教学用书

近代交流调速

(第 2 版)

GAODENG

XUEXIAO

JIAOXUE

YONGSHU

冶金工业出版社

高等学校教学用书

近代交流调速

(第2版)

东北大学 佟纯厚 主编

冶金工业出版社

(京)新登字036号

图书在版编目 (CIP) 数据

近代交流调速/佟纯厚主编. -2版. -北京:冶金工业出版社, 1995

高等学校教学用书

ISBN 7 5024-1625-0

I. 近… II. 佟… III. 交流电机:多速电机-调速-高等学校-教材 IV. TM344.1

中国版本图书馆CIP数据核字 (94) 第13211号

出版人 卿启云 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号 邮编100009)

有色曙光印刷厂印刷, 冶金工业出版社发行: 各地新华书店经销

1995年5月第1版, 1995年5月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16, 14.75印张, 350千字, 228页, 1-5000册

8.70元

第一版前言

本书是高等学校工业电气自动化专业（本科生和研究生）《近代交流调速》课程的教学用书。为了突出重点，本书着重分析带方向性发展的近代几种主要交流调速拖动方式，包括串级调速、变频调速、无换向器电机、矢量变换控制及微型机在交流调速拖动中的应用等，主干内容为变频调速拖动。

全书共分十三章。绪论综述近代交流调速的特点及其发展动向；第一章变频调速的一般基础，着重分析变频原理、变频原则及其机械特性；第二章至第六章着重分析交-直-交变频器（电压型、电流型及脉宽调制型）的主电路、换流原理、参数计算及控制系统的组成，并对电流型变频器的多重化技术做了详细分析，对电流型变频器在风机水泵类机械中的节能节电应用做了介绍；第七章着重分析交-交变频器的工作原理、换向过程、主电路及控制方式；第八章介绍无换向器电机的基本原理、换流方法、调速方法及四象限运行状态；第九、十两章着重分析矢量变换控制的理论、坐标变换方法、运算功能及其控制系统结构；第十一章介绍串级调速原理、静态分析、参数计算及超同步串调系统；第十二章介绍交流步进机的原理分析及其控制方式；第十三章简要介绍微型计算机的工作原理及其在交流调速拖动中的控制应用。在全书末尾列有参考文献。

本书绪论、第一章至第五章及第八章、第十章由佟纯厚同志编写，第六章由潘清波同志编写，第七章及第十二章由刘宗富同志编写，第九章由高宝贤同志编写，第十一章由贺斌英同志编写，第十三章由汪林同志编写，全书由佟纯厚同志担任主编。

使用本教材时，第四、五、九、十二及十三章等内容，可以根据各校实际情况，灵活掌握。这几章内容也可以做为研究生的学习研究专题。

本书在编写过程中，得到了东北工学院交流调速研究室全体同志的大力支持与帮助，并提出了宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中一定存在缺点和错误，诚恳希望同志们批评指正。

编 者

1984年5月

EAD09/1501

第二版前言

近代交流调速属电力电子学范畴,它是80年代新兴的一门边缘学科,其特点是以电力半导体器件为核心,交叉于电力、电子、信息与控制等多种学科领域。近年来随着微电子学、电力电子学及自动控制理论的发展,国内外近代交流调速也发展十分迅速。本书从1985年6月第一版出版发行到现在已有7年。在这期间,交流调速技术在理论研究和实用技术方面都有了很大发展。第二版结合近年来这些发展和教学、科研经验的积累,对第一版的内容结构及内容作了较大的修改和增删。

第一版共十三章,第二版改为九章。在第二版的绪论中丰富了近代交流调速发展方向综述内容;第一章变频调速一般基础,增加了变频器的换流方式和变压方式;第二章交-直-交电压型变频器,加强了换流参数的分析与计算;第三章交-直-交电流型变频器,充实了换流过程的深入分析;第四章电流型变频器的多重化技术,重点放在二重化技术分析;第五章PWM逆变器,增强了脉宽调制新技术和微机控制技术的分析讨论;第六章交-交变频器进行了全面改编;第七章异步电动机的动态数学模型及矢量控制,把第一版的绕线型异步电动机的矩阵方程和坐标变换的内容与异步电动机的矢量控制结合在一起进行分析与讨论;第八章同步电动机矢量控制系统为新增内容;第九章典型变频调速系统主电路参数计算与设计是新增内容,以利于对几种典型变频器系统加深理解,并为课程设计和毕业设计提供指导性参考。

第二版的特点是:(1)增加了近年来发展的高新技术内容,专章讨论了同步电动机的矢量控制,丰富了脉宽调制技术和微机控制技术等;(2)增强了实用性技术。在各章中均有相应的典型实例分析;增加了《典型变频调速系统主电路参数计算与设计》一章,运用已学理论知识,联系典型实例进行分析与设计计算;(3)本着少而精的精神,突出交流电动机变频调速的重点,删去了第一版中的第五章、第八章、第九章、第十一章、第十二章和第十三章,其中第十章和第十三章的内容已结合到第二版的有关章节中。

本版绪论、第一章及第四章由佟纯厚编写,第二章、第六章由韩安荣编写,第三章、第七章由贺斌英编写,第八章由顾树生编写,第九章由王朝利编写,全书由佟纯厚担任主编,贺斌英也参与了统稿工作。

在第二版编写过程中,得到了东北大学交流调速研究室全体同志的支持,并得到了北京科技大学周绍英、鞍山钢铁学院李则民、华东冶金学院洪乃刚、东北大学刘宗富、彭鸿才等专家教授的评审,提出了宝贵意见,在此一并表示衷心地感谢。

由于编者水平所限,书中可能存在缺点和问题,敬请读者提出批评指正。

编者

1992年5月

目 录

绪论	1
第一章 变频调速的一般基础	7
第一节 变频调速原则及其机械特性	8
第二节 变频器的工作原理	14
第三节 逆变器的换流方式	17
第四节 变频器的变压方式	19
第五节 变频调速时的传递函数	21
第二章 交-直-交电压型变频调速系统	24
第一节 概述	24
第二节 串联电感式电压型逆变器	25
第三节 带辅助晶闸管换流的电压型逆变器	32
第四节 电压型变频调速系统	35
第五节 应用举例	38
第三章 交-直-交电流型晶闸管变频调速系统	41
第一节 串联二极管式电流型逆变器	41
第二节 电流型逆变器主电路元件选择	49
第三节 电流型逆变器在应用中的几个问题	51
第四节 电流型逆变器的特点及应用	53
第五节 转速开环、 U/f 恒定的交-直-交电流型变频调速系统	56
第六节 转差频率控制的交-直-交电流型变频调速系统	58
第四章 电流型变频器的多重化技术	65
第一节 转矩脉动与电流谐波的关系	65
第二节 多重化技术的组成方式	66
第三节 多重化输出电流的分析方法	69
第四节 直接输出型多重化方式的谐波分析	71
第五节 变压器耦合输出型多重化方式的谐波分析	72
第五章 PWM逆变器	78
第一节 PWM逆变器的基本工作原理及其发展趋向	78
第二节 脉宽调制技术	84
第三节 PWM交流调速	96
第四节 PWM逆变器的微机控制	109
第六章 交-交变频器	120
第一节 交-交变频器的工作原理与分类	120
第二节 交-交变频器的主电路	124

第三节	交-交变频器的环流处理方式	127
第四节	交-交变频器的触发控制	130
第五节	交-交变频调速系统	134
第七章	异步电动机的动态数学模型及矢量控制	140
第一节	A、B、C坐标系统异步电动机的动态数学模型	140
第二节	空间矢量的概念	148
第三节	异步电动机的空间矢量方程式	152
第四节	空间矢量分解为 x , y 分量	158
第五节	坐标变换及坐标变换电路	163
第六节	异步电动机的矢量控制	169
第七节	异步电动机矢量控制系统举例	176
第八章	同步电动机矢量控制系统	181
第一节	同步电动机矢量控制的基本原理	181
第二节	控制系统的主要单元	185
第三节	速度调节与电流调节	193
第四节	转子励磁控制系统与气隙磁链控制	195
第五节	同步电动机矢量控制系统简图与起制动工作简介	195
第九章	典型变频调速系统主电路参数计算与设计	199
第一节	电流型变频器主电路参数计算与设计	200
第二节	带有辅助晶闸管换流的电压型变频器主电路设计	209
第三节	晶体管PWM变频器主电路参数计算与选择	217
主要参考文献		227

绪 论

一、交流调速拖动的特点

根据转速是否变化的观点, 各类生产机械可以分为恒速拖动机械和调速拖动机械两大类。由于电能生产变换经济, 传输分配容易, 使用控制方便, 因而电力拖动已广泛应用于各类生产机械。为了满足电力拖动调速机械的生产工艺要求, 提高产品质量和生产率, 电力拖动系统的调速性能具有重要意义。

长期以来, 由于直流调速拖动系统的性能指标优于交流调速拖动系统, 因此直流调速拖动系统一直在调速领域内占居首位。例如发电机电动机列欧纳德 (Leonard) 控制方式, 带有交磁放大机的发电机电动机以及晶闸管电动机调速系统, 在额定转速以下用改变电枢电压的方法调速, 在额定转速以上用改变励磁的方法调速。采用反馈和前馈的直流调速拖动系统可以得到高精度的转速调节。因此, 在过去的年代里, 人们在概念上已形成直流调速拖动比交流调速拖动好的深刻印象。但是由于直流电机本身结构上存在有机械整流器和电刷, 所以给直流调速拖动系统带来了下面四个主要缺点:

- (1) 维护困难;
- (2) 设置环境受到限制, 易燃易爆以及环境恶劣的地方不能适用;
- (3) 在结构发展上, 制造大容量、高转速及高电压的直流电机比较困难;
- (4) 造价高。

随着电力电子学的飞速发展, 各种大功率半导体器件诸如晶闸管及电力晶体管等的出现, 促使交流调速飞跃进步。它已进入与直流调速拖动相媲美、相竞争的时代, 并有取而代之的趋势, 因此, 对交流和直流拖动的调速性能要重新给予评价。

在交流调速拖动系统中, 通过半导体功率变换器改变输出电压、电流和频率等参数来给交流电动机提供调速电源, 从而进行转速调节, 其示意图如图 0-1 所示。这里半导体功率变换器有下列四种形式:

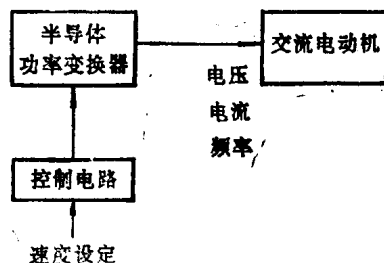


图 0-1 交流调速拖动系统

(1) AC/DC 由定压定频的交流变换为直流的功率变换器, 称之为顺变器或整流器;

(2) DC/DC 由定压直流变换为可调直流电压的功率变换器, 称之为斩波器, 相当直流脉冲调压方式;

(3) DC/AC 由直流变换为可调频率的交流, 称为逆变器或变频器;

(4) AC/AC 由定压定频交流变换为调压调频交流, 称为循环变流器。

由前三种或二种组成的半导体功率变换器, 称为交-直-交变频器或间接式变频器。由后者组成的半导体功率变换器, 称为交-交变频器或直接式变频器。各类变频器其输出一般为可变电压可变频率形式, 可简称为 VVVF 变频器。由这样功率变换器组成的交流拖动调速系统有如下特点:

- (1) 可以扩大交流电机的容量, 提高交流电机的转速和电压;

- (2) 交流电机特别是鼠笼式异步电动机设置环境适应性广;
- (3) 维护省力;
- (4) 异步机结构简单, 坚固耐用, 惯性小;
- (5) 由于高性能、高精度新型调速系统的不断出现和发展, 完全可以得到同直流调速系统一样好的性能指标;
- (6) 交流电机的造价低。

正是这样, 交流调速系统在性能上可和直流调速一样, 但它克服了直流调速系统现存的缺点, 且发挥了交流机本身固有的优点, 所以近些年来交流调速拖动在国内外引起了人们极大的重视和飞跃的发展。

二、交流调速拖动系统的发展动向

1. 近代交流调速发展分支

国内外交流调速发展的方式多种多样, 在发展过程中形成了下述的几个主要分支, 各分支中都有各自的内容和不同的特点。

(1) 变频调速 它是最有前途的一种交流调速方式, 也是交流调速的基础和主干内容。变频器类别有交-直-交系统与交-交系统。交-直-交系统在电压型和电流型的基础上, 正向着脉宽调制 (PWM) 型变频器和多重化技术方向发展; 交-交变频器在低速大容量系统上应用有上升趋势。变频器所用的电力半导体元器件正向着模块化、快速化、光控化、高电压大电流化、自关断化和高可靠性化方向发展。变频调速正向着高性能、高精度、大容量、微型化、数字化和理想化方向发展。

(2) 串级调速 它是利用绕线式异步电动机的转差功率, 相当于转子附加电势的一种比较经济的调速方法。我国晶闸管串级调速技术比较成熟, 有系列化产品, 有实用经验, 在有条件的地方应尽量采用。

(3) 双馈电动机 亦称超同步串级调速, 它是定子由电网电源供电、转子由变频器电源供电的绕线型异步电动机。双馈电动机具有其它电动机所没有的优点: 在同步速度以上运行时, 不但可以运行在再生发电制动状态, 还可以运行在电动状态。这样, 装置容量不扩大, 而调速范围却扩大了。自控式双馈电动机具有异步电动机的特性, 他控式双馈电动机具有同步电动机的特性, 如采用矢量控制将类同直流拖动系统, 并可改善系统功率因数, 是很有发展前途的一种调速方式。

(4) 无换向器电动机 又称晶闸管电动机, 它是具有位置检测器的同步电动机, 由变频装置供电的电机系统。由于用位置检测器和晶闸管代替了相当于直流电动机的电刷和机械整流器, 所以无换向器电动机的原理和特性同直流电动机相似, 可以等效为具有三个换向片的直流电动机。系统采用自控式, 因而它的频率与转速永远保持同步关系, 不会发生失步现象。它的起动、调速特性类似于直流电动机, 完全克服了同步电动机原有的缺点, 同时又兼有同步电动机功率因数好的优点。国外有的权威人士甚至断言: “如果说交流调速将取代直流拖动的话, 那么无换向器电动机将取代其它交流调速方式”。

(5) 交流步进拖动系统 它在计算机外围设备和数字控制系统 (包括数控机床, 数控仪器仪表) 中得到广泛应用。步进机早期为电磁铁式, 现已发展为电机型, 同步电动机就是一种良好的步进电动机。它由静止变频器供电, 离散为步进磁场, 形成空间有限停靠点进行步进工作。普通同步电动机或反应式同步电动机是一种大角度步进机, 可以构成高速

运行系统；减速反应式同步电动机是一种小角度步进机，可以构成低速运行系统。由稀土永磁同步电动机和晶体管变频器组成的新一代交流步进拖动系统，将在中小容量高精度定位控制领域中得到迅速发展。

(6) 交流伺服系统 在机器人和机床等精密位置控制系统中，已由原先的液压传动和直流伺服系统开始转向交流伺服系统。最近几年出现两种新的交流伺服系统：一种是由晶体管变频器供电的永磁式同步电动机伺服系统，另一种是采用矢量控制的异步电动机式交流伺服系统。

(7) 高频化技术应用 交流电源的高频化可使电气产品体积小、重量轻、效率高、性能好等，并节能节电。例如静止高频逆变器（400~800~2000Hz）应用于磨床，取代交流变频机组，可节电30%以上。

(8) 无功补偿和谐波抑制 为保证供电质量，国家对功率因数和谐波极限提出要求，为达到这些指标必须采取相应措施。提高功率因数的关键在于减少无功电流，措施之一是提高自然功率因数，措施之二是用人工补偿法提高功率因数。以往通常采用移相电容器或同步调相机，最近发展的无功动态补偿是提高功率因数的一个有效途径。对于高次谐波的抑制，可将整流变压器接成Y/△或△/Y型，增加整流器的脉冲次数以及加装调谐滤波器。

(9) 交流调速节能技术 交流调速广泛应用于冶金、矿山、化工、交通、农业及国防等国民经济及人民生活的各个领域。但首先在风机水泵类机械中采用调速控制代替挡板或节流阀控制流量，具有显著的节能效果，是节电的有效途径。国外已普遍采用交流调速节能技术，国内在变负荷的风机水泵上正在加速推广应用。风机水泵的特点是使用量大、应用面广、耗电量多，其每年耗电量占全国用电量的31%，占全国工业用电量的40~45%，是一个用电大户，具有很大节电潜力。风机的功率与转速的三次方成正比，当风量由100%减少到50%时，如果采用挡板控制，其输入功率减少不多，而采用调速控制，转速下降一半同样可以满足50%的风量输出，其所需功率将下降到额定功率的13%，即使考虑附加控制装置的损耗等，一般仍可节电20%~30%以上，初投资可在1~3年内收回。

2. 近代交流调速控制技术的发展

下面列举近代交流调速控制技术发展的十个方面，它们既有相互联系又有区别，形成了各自的控制特点，现在正在不断丰富、充实和发展中。

(1) 相位控制 它主要应用于交-交变频器和交-直-交变频器中的整流器控制，同一般整流控制原理一样，采用相位控制原则。

(2) VVVF控制 为保持恒磁通变频控制（或恒转矩控制）原则，要求变压变频控制（即VVVF控制），这是协调控制条件所要求的。通常把变频装置也称为VVVF装置。

(3) 转差频率控制 在调速过程中，保持有限的转差频率值进行控制，可以获得高效调速方式。在转差率很小时，考虑转矩 T 、转差频率 f_s 及转子电流 I_2 成正比的关系，因此用定子电流幅值 I_1^* 和静态同步角速度 ω_1^* 去控制变频器。这种方式系统简单，需要测速机检测，是当前常用的高性能转差频率矢量控制的基础。

(4) 脉宽调制(PWM)控制 脉宽调制型变频器由于具有输入功率因数高和输出波形好的特点，近年来发展较快，其技术关键之一是PWM调制方法，例如SPWM（正弦波PWM）、准SPWM（准正弦波PWM）、DMPWM（Delta调制PWM）、矢量角PWM、最

佳开关角PWM、电流跟踪PWM等。从原理上讲有面积法、图解法、算法、采样法、优化法、斩波法、角度法、跟踪法和次谐波法等。

脉宽调制以往多用于交-直-交电压型变频器，最近几年电流型变频器也开始应用，电流跟踪PWM就是其中一例。

(5) 矢量变换控制 矢量变换控制是一种新的控制理论和控制技术。其控制思想是设法模拟直流机的控制特点对交流机进行控制。我们知道，调速的关键是转矩控制问题。直流电机之所以调速性能好的根本原因就在于它的转矩控制容易。直流机转矩表达式为 $T = C_M \Phi I_a$ ，可以分别控制电枢电流 I_a 和磁通两个参数，它们之间互成 90° 直角坐标正交关系，且为两个独立变量，可以分别进行调节，在电路上互不影响。异步电动机的转矩表达式为 $T = C_M \Phi_m I_2 \cos \varphi_2$ ，式中转子阻抗角 $\varphi_2 = \arctg x_2 / r_2$ 。异步电动机的转矩与转子电流 I_2 、气隙有效磁通 Φ_m 有关，且与转速（转差率 s ）有关， I_2 与 Φ_m 两个参数既不成直角又不是独立变量，转矩的这种复杂关系成为异步电动机难于控制的根本原因。为使交流电动机得到和直流电动机一样的控制特点，必须通过电机的统一理论和坐标变换理论，把交流电动机的定子电流 I_1 分解成磁场定向坐标的磁场电流分量 I_{1m} 和与之相垂直的坐标转矩电流分量 I_{1r} ，把固定坐标系变为旋转坐标系解耦后，把交流量的控制变为直流量的控制，便等同于直流机了。它分有磁场定向式矢量控制和转差频率式矢量控制。前者调速精度高，磁通检测需准确，后者只用测速机控制，系统简单，调速精度不如前者，两者均属高性能交流调速系统。

(6) 磁场控制 近年，从磁场的观点控制交流电动机，同PWM控制一样有所发展，下面简介两种：

① 磁场轨迹法 交流电动机三相对称绕组通以三相对称电流时，电机将产生圆形旋转磁场带动转子旋转。而开关型逆变器只能获得步进磁场， 180° 导通型和 120° 导通型只能获得六角型旋转磁场，二者结合起来可得12拍控制（相当于 150° 导通型），获得12边形的旋转磁场。如以这些已有电压矢量为基础，组成适当的主矢量、辅矢量，它们分别导通不同时间进行PWM调制求矢量和，则可构成许多新的中间电压矢量，使之形成逼近圆形旋转磁场，这就是磁场轨迹法控制的基本思想。这样的逼近圆形旋转磁场与一般交流电动机的性能接近，改变旋转磁场的速度即可调节电动机的转速。

② 异步电动机的磁场加速法 磁场加速法是防止励磁电流发生电磁暂态现象，对电机的定子电流按一定规律进行控制，由于它能消除暂态现象，因此可以实现象直流机那样快速响应。为保持气隙磁通或转子磁通不发生暂态现象，可以推出不同的保持励磁电流无暂态过程的定子电流控制条件，按其电流控制条件去进行控制就能使异步电动机磁场加速最快。

(7) 微机控制 近年来交流调速领域出现了以微型计算机、微处理机为核心的新一代控制系统及单元，并从部分采用微处理机的模拟数字混合控制向着全面采用微型机的全数字化控制方向发展，除具有控制功能外，还向着具有多功能（包括监视、显示、保护、故障自诊断及自复原等）方向发展。由于要求微机的功能不断增多，必须由8位机向16位机或32位机的应用发展。目前也有采用多台单板机、多CPU数字控制系统。看来微型计算机在交流调速拖动中的应用由普通型走向单板机→单片机→专用控制机的专业化功能道路势在必行，国内交流调速的微机控制正向着完善、提高和实用化阶段迈进。

(8) 现代控制理论的应用 现代控制理论在交流调速中的应用发展很快, 诸如自适应控制(磁通自适应、断续电流自适应、参数自适应等模型参考自适应控制), 观测控制及状态观测器(磁通观测器、转矩观测器等), 采用前馈控制、补偿速度降以提高调速精度, 以节能、平稳、快速等为目标函数的优化控制, 线性二次型积分控制(LQI), 滑模变结构控制及模糊控制等等。原来认为现代控制理论用于交流调速拖动是比较遥远的事情, 现在看来已经成为现实。

(9) 直接转矩控制 1985年提出的直接转矩控制, 其特点是不需坐标变换, 将检测来的定子电压和电流信号进行磁通和转矩运算, 实现分别的自调整控制。这种系统结构简单, 对电机参数变化不敏感, 实现转矩、磁通闭环控制, 可获得良好的调速性能, 是一种高动态的PWM控制系统。一般PWM是靠提高调制频率实现高动态, 本系统是以转矩和磁通的独立跟踪自调整实现PWM高动态, 它的逆变器成本低、效率高。

(10) 多变量解耦控制 利用现代控制理论设法将多变量、强耦合非线性系统解耦成两个单变量系统, 再借古典控制理论设计调节器参数。应用小位移线性化理论可导出两输入两输出强耦合系统, 再用不变性解耦原理解耦成两个单变量系统, 方法是加入预补偿矩阵, 使系统变成对角优势阵或对角阵而解耦, 相当于系统引入解耦矩阵, 抵消耦合支路。

随着电力半导体元器件及变频装置的发展, 电机发展的动向是:

- (1) 无换向器电机代替直流电机;
- (2) 某些场合部分双馈电机将代替同步电机;
- (3) 发挥稀土资源优势, 我国将大力发展永磁电机(包括同步机、励磁机、直流机及步进机等);
- (4) 发展新型合理结构的异步机;
- (5) 发展智能化电机, 实现电子-电机的机电一体化产品。

三、半导体功率变换器存在的共性问题

由半导体功率变换器组成的整流器、逆变器、斩波器及交-直-交变频器与交-交变频器等装置在交流调速领域中得到广泛应用, 但目前还存在着如下的缺点和问题。

1. 高次谐波的影响

由于这些装置的输出电压、电流波形为非正弦波如矩形或梯形, 含有高次谐波, 特别是5、7次谐波, 其影响是严重的。它使电动机产生附加损耗, 温升增加, 电动机的出力受到限制, 同时使特性恶化。当用变频器供电时, 电动机效率有时降低5~7%左右, 而电流增加10%。因此在选用电动机容量时, 应适当增加10%左右的裕量。由于高次谐波影响, 电动机和电器的噪声增大, 对无线电通讯干扰增大等等。

高次谐波也使电动机产生转矩脉动, 它在高速运转时影响还不大, 但在低速稳定运行时影响较大。转矩脉动的频率 $6kf(k=1, 2, 3, \dots)$, 当转矩脉动频率较低, 接近机械系统固有频率时, 容易产生机械共振现象。即使转矩脉动很小(譬如1%)若其共振倍率为130~300, 则当机械共振时, 将会产生大于几倍额定转矩的力矩, 超过机械允许应力, 造成机械迅速破坏的严重后果。为此, 调速装置应避免在共振点以下运行。为改善输出波形, 要减少高次谐波成分。一般采取的措施有:

- (1) 利用细分电路进行控制, 使一周期内波形阶梯多段化, 譬如采用正弦电流变频器等,

(2) 采用脉宽调制 (PWM) 变频器;

(3) 电流型及电压型变频器采用多重化技术等。

2. 功率因数变坏

晶闸管整流器及逆变器的相位控制, 使它们的功率因数变坏, 这对供电电源的质量带来不利的影响。异步电动机在晶闸管电力变流器供电时运行的功率因数有时比它在正弦波电源供电下运行的功率因数低 8%。为此, 要开发研究输出波形为正弦波及功率因数高的晶体管电力变流器, 同时研究改善功率因数的有效措施。另外, 设计出专门为晶闸管电力变流器供电用最佳结构的新型系列的电动机, 乃是当前主要研究课题之一。

3. 瞬时停电措施

电源供电系统因雷击或其它原因发生接地故障时, 将发生紊乱。从事故发生到瞬時事消除或通过继电保护切断事故回路, 这一段时间就是瞬时停电的含义。它不是指长时停电, 而是瞬时停电, 一般在 1 秒以下, 常在 0.3 秒以内, 如果变频装置没有瞬时停电措施, 可能产生过电压或过电流现象, 在恢复供电时可能造成逆变器换流失败。因此, 应设有必要的瞬时停电措施, 首先对瞬时停电 (不管是三相或单相停电、缺相或三相电压不平衡等) 要能用响应快的仪表检测出来, 一方面使吸收回路及时吸收瞬态能量, 另一方面使变频装置仍能维持运行, 并在恢复供电时能按顺序运转。

4. 元器件、装置及电动机相互配套问题

近代交流调速的飞速发展, 将促使元器件、装置及电动机三者组成新型交流调速装置的一个整体, 故对电力半导体器件的生产、电控装置的装配、以及电动机的设计制造, 要求相互间有很好的配套和结合。元器件生产的规格、品种和系列要满足交流调速装置的要求。电动机和装置更要紧密地配合, 应设计制造出最佳结构的新型系列的电动机。电控装置本身在设计和制造上要提高工艺水平、可靠性和性能价格比等。

第一章 变频调速的一般基础

交流电机的同步转速表达式为

$$n_1 = \frac{60f}{p} \quad (1-1)$$

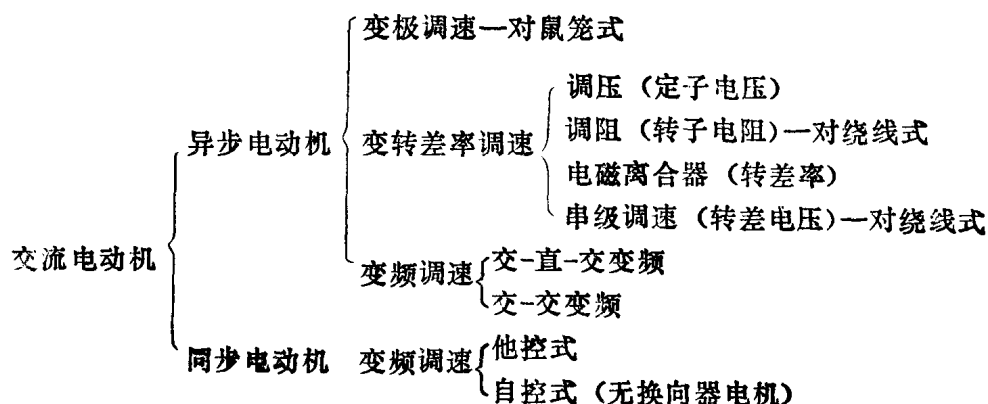
根据异步机转差率的定义

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = 1 - \frac{n}{n_1} \quad (1-2)$$

可知异步机的转速为

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s) \quad (1-3)$$

因而异步电动机的调速方法可以有变转差率、变极对数及变频三种。其中变转差率的方法又可以通过调定子电压、转子电阻、转差电压以及定、转供电频率差等方法来实现。同步电动机的调速可以用改变供电频率，从而改变同步转速的方法来实现。这样，交流电动机就有很多不同的调速方法



在上述各种调速方法中，绕线式异步电动机的串级调速、鼠笼式异步电动机的变频调速及无换向器电动机调速很受人们的重视，并且已在工业中获得了应用。

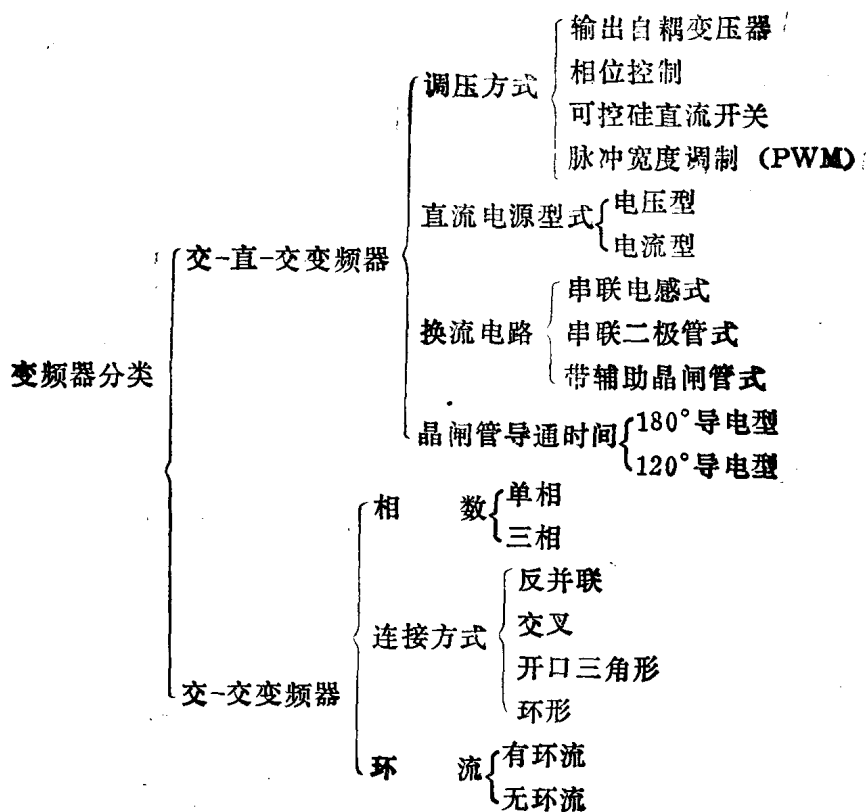
靠改变转差率对异步电动机进行调速时，由于低速时转差率大，转差损耗也大，所以效率低。在串级调速中通过“能量回馈”的办法将这部分功率加以利用，可以提高效率。

变频调速方法与变转差率调速方法有本质的不同。变频调速时，从高速到低速都可以保持有限的转差率，因而变频调速具有高效率、宽范围和高精度的调速性能。可以认为变频调速是交流电动机的一种比较合理和理想的调速方法。

为了使交流电动机供电频率可变，自然需要一套变频电源。但在过去是采用一整套旋转变频机组或离子变频器来改变电源频率，这套设备初投资大，效率低，可靠性差，因此这种变频调速方法没能得到推广。

60年代晶闸管元件及变流技术的发展，使变频调速方法重新受到人们的重视，并已经在生产的很多领域中获得了应用，目前变频调速是交流电动机调速的重要发展方向。

变频器可以分为交-直-交变频器与交-交变频器两大类。前者又常称带直流环节的间接式变频器，后者又常称直接式变频器。每一类又可以根据不同分类方法加以区分，如下表所示。



第一节 变频调速原则及其机械特性

根据控制方式的不同，可以有三种不同的变频调速原则：

- (1) 恒磁通变频调速；
- (2) 恒流变频调速；
- (3) 恒功率变频调速。

下面分别讨论各变频调速原则的控制条件及其机械特性。

一、恒磁通变频调速

异步电动机的电势方程为

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 k_{w1} \Phi_m \quad (1-4)$$

如果忽略定子压降，则上式可写成

$$U_1 \approx E_1 = K_E f_1 \Phi_m \quad (1-5)$$

式中 $K_E = 4.44 N_1 k_{w1}$ 为电势常数。

若异步电动机定子供电电源电压一定时，则磁通 Φ_m 随频率 f_1 的变化而变化。一般在电机设计中，为了充分利用铁心材料，都把磁通的数值选在接近磁饱和的数值上。因此，如果频率 f_1 从额定值（通常为50Hz）往下降低，磁通会增加，造成磁路过饱和、励磁电流大大增加。这将使电动机带负载能力降低，功率因数变坏，铁损增加，电动机过热，因此这是不允许的。

反之如果频率往上升高,磁通减少,在一定的负载下有过电流的危险,这也是不允许的。为此通常要求磁通保持恒定,即

$$\Phi_m = \text{const} \quad (1-6)$$

为了保持 Φ_m 恒定,根据式(1-5)可知,必须使定子电压随频率成正比变化,即

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U'_1}{f'_1} \quad (1-7)$$

式中 U'_1 , f'_1 为变化后的定子电压和频率。或者保持定子电压和频率的比值不变,即

$$\frac{U_1}{f_1} = \text{const} \quad (1-8)$$

上式是恒磁通变频原则所要遵循的协调控制条件。

根据异步电动机的转矩表达式

$$T_e = C_M \Phi_m I_2 \cos \varphi_2 \quad (1-9)$$

当有功电流额定, Φ_m 为常数时,电动机的输出转矩也恒定,因而这种按比例的比例协调控制方式属于恒转矩调速性质。

从“电力拖动基础”课程内容知道,异步机的机械特性有三种表达式:物理表达式、参数表达式及实用表达式,分别如式(1-9)、式(1-10)及式(1-11)所示。

$$T_e = \frac{pm_1 U_1^2 r'_2 / s}{2\pi f_1 [(r_1 + r'_2 / s)^2 + x_k^2]} \quad (1-10)$$

$$T_e = \frac{2T_{max}}{\frac{s}{s_m} + \frac{s_m}{s}} \quad (1-11)$$

物理表达式(1-9)反映了不同转速时 T_e 与 Φ_m 及转子电流有功分量 $I_2 \cos \varphi_2$ 间的关系,它经常用于从物理概念上讨论机械特性的变化规律。参数表达式(1-10)反映了异步电动机的转矩与电动机内部参数及电源参数间的关系,它经常用于讨论各种参数对机械特性的影响及参数计算。例如当转矩一定时,转子电阻与转差率的比值 r_2/s 不变。这个概念在计算异步电动机起动电阻和制动电阻时是很重要的。又如,异步电动机的转矩和定子电压的平方成正比,受电网电压波动的影响较为严重。根据电动机的名牌数据,实用表达式(1-11),最适用于电动机机械特性的工程计算。

由于改变定子电源频率可以改变同步转速和电动机转速,所以容易画出异步电动机在不同频率下, U_1/f_1 比值为常数时的一族机械特性曲线,如图1-1所示。其最大转矩为

$$T_{max} = \frac{pmU_1^2}{4\pi f_1 (r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2})} \quad (1-12)$$

式中短路电抗 $x_k = 2\pi f_1 L_k$ 。

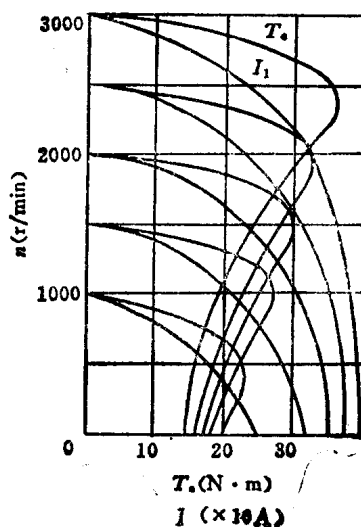


图1-1 U_1/f_1 = 常数时变频调速机械特性

当频率较高时, $x_k \gg r_1$, 故 r_1 可忽略, 则

$$T_{\max} = \frac{\phi_m U_1^2}{4\pi f_1 \cdot 2\pi f_1 L_k}$$

在压频比 $U_1/f_1 = \text{常数}$ 时, $T_{\max}$ 保持不变。

当频率较低时, $r_1 \gg x_k$, 忽略 x_k , 则

$$T_{\max} = \frac{\phi_m U_1^2}{4\pi f_1 \cdot 2\pi r_1} = \frac{\phi_m k_{ut}^2}{8\pi r_1} \cdot f_1$$

如仍保持压频比 $U_1/f_1 = k_{ut}$ 不变时, 最大转矩将随频率 f_1 的降低而减少。从图1-1中可以明显看出来这一点, 其根本原因在于电动机定子电阻 r_1 引起的电压降在低频低压时相对影响较大所致。

从 (1-5) 式中知道, 理想地保持磁通 Φ_m 恒定, 应该满足

$$\frac{E_1}{f_1} = \text{const} \quad (1-13)$$

这也是保持恒最大转矩变频调速的协调控制条件。但由于电动机的感应电势 E_1 难以测得和控制, 故在实际应用中为了在低频时仍能近似保持恒磁通变频调速, 一般在控制回路中加入一个函数发生器控制环节, 以补偿低频时定子电阻所引起的压降影响。图1-2为函数发生器的各种补偿特性, 曲线①为无补偿时的 U_1 与 f_1 的关系曲线, 曲线②, ③, ④, ⑤为有补偿时各种 U_1 与 f_1 的关系曲线, 其中②, ③补偿特性由于函数发生器容易组成且补偿效果良好, 故比较常用。图1-3为补偿后得到的 E_1/f_1 近似等于常数时恒最大转矩变频调速的一族机械特性曲线。

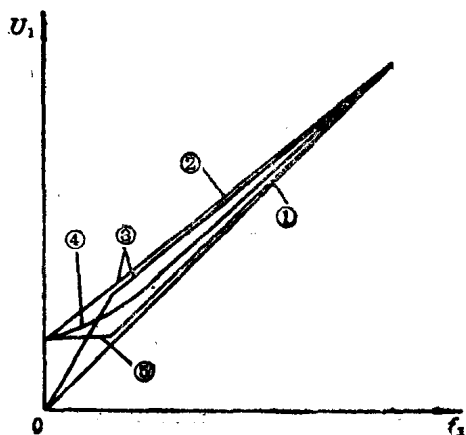


图 1-2 恒磁通变频调速时的补偿特性

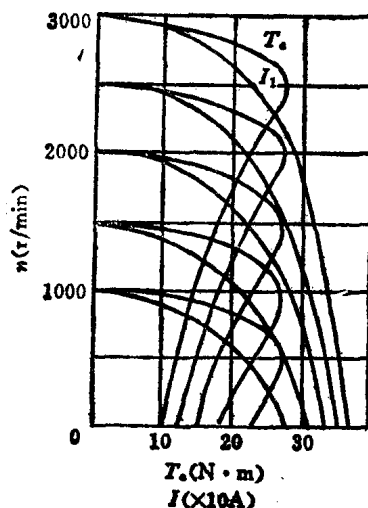


图 1-3 补偿后的恒 $T_{\max}$ 变频调速的机械特性

由以上分析可见, 异步电动机恒磁通变频调速必须在变频的同时进行调压并在低频时加以补偿, 才可以获得恒磁通恒最大转矩的调速特性。

二、恒流变频调速

变频器给异步电动机供电时, 也可以采用恒流变频调速方式, 通过电流调节器进行闭环调节。这种控制线路最简单, 工作可靠性高。

这种变频电源属于恒流源, 在变频调速过程中始终保持定子电流恒定, 即