高 等 学 校 教 材

现代交流传动及其控制系统

西南交通大学　沈本荫　主编
北方交通大学　王立文　主审

中 国 铁 道 出 版 社
1997年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书着重分析带方向性的几种交流传动系统,其主干内容为异步电动机变频调速。本书主要讨论交流传动系统的能量转换、变频调速异步电机的控制方式及数学模型、异步电动机变频调速控制系统、矢量控制及直接力矩控制系统、系统动态稳定性、自控同步电动机调速系统、串级调速系统等。

本书除作为高等学校教材外,还可供从事科研、设计等单位的技术人员参考。

高 等 学 校 教 材
现代交流传动及其控制系统
西南交通大学　沈本荫　主编
*
中国铁道出版社出版、发行
(北京市宣武区右安门西街 8 号)
责任编辑　方　军　封面设计　翟　达
各 地 新 华 书 店 经 售
中国铁道出版社印刷厂印

开本: 787× 1092　1/16　印张: 17.5　字数: 432 千
1997 年　月　第 1 版　第 1 次印刷
印数: 1- 00000 册

ISBN 7-113-02578-1/U · 714　　定价: 13.60 元

前　　言

交流电机传动调速是现代电气传动的主要发展方向，它对提高电气传动系统的运行性能和节约能源有很重要的意义。

交流电气传动技术是近年来随着电力电子学发展而新兴的一门强弱电交叉学科，内容涉及电力电子器件、变流器电路、自动控制理论、电机、微电子学以及微型计算机控制等许多领域。因此，交流传动技术总的来说是比较复杂的。

为适应学科发展和专业需要，近年来许多高校开设了“交流传动调速”这门课程。

本教材是根据铁道部专业教学指导委员会拟定的教学计划编写的，是工业自动化、电力牵引与传动控制、电力电子技术等专业本科生和研究生的教材。

为突出重点，本书着重分析带方向性的现代几种交流调速传动方式，其主干内容为交流异步电动机的变频调速。

全书内容共分十章。在绪论中综述了现代交流传动的特点及其发展方向；第一章介绍了交流传动系统中由晶闸管构成的变频电路、换流理论及参数设计，并重点分析了大功率晶体管(GTR)和门极可关断晶闸管(GTO)的基本特性及应用技术，它们是电力电子学中广泛讨论的主题；第二章分析了异步电机变频调速的控制方式及运行特性，它是交流传动系统的控制基础；第三章介绍了异步电机的数学模型、坐标变换及电机的统一理论，作为深入分析各种控制方式及动态性能的理论基础；第四章介绍近年来发展很快的脉宽调制(PWM)技术及其优化的一般方法；第五章为变频调速控制系统，讨论系统的类型和发展，并重点分析了系统构成的主要环节及系统的动态结构；第六章重点分析了矢量控制系统和直接力矩控制系统两个专门问题，在对系统建模的基础上，对矢量控制系统的解耦性质作了较为深入的论述；第七章介绍了系统的稳定性，根据系统的运动方程，用劳斯—古尔维茨判据对系统的稳定性进行判定；第八章是同步电动机自调频调压调速系统；第九章为异步电动机串级调速系统，介绍了调速原理、特性分析以及基本参数的计算方法；第十章为微型计算机在变频调速系统中的应用，介绍了系统硬件、软件及接口电路的设计，并用几个实例，详细讨论了微机控制的变频系统。

本书在内容编排上力求反映现代交流传动发展的水平和体现跨学科的特点，并给出交流传动学科领域内一个完整的论述。

本书除适用于有关专业学生的教材外，对在交流传动领域内从事设计、开发或研究的工程技术人员，也有较强的参考价值。

由于本书涉及的新理论和新技术仍在不断发展，编者也在不断地研究和探索。

本书由西南交通大学沈本荫教授主编，北方交通大学王立文教授主审。书中绪论、第二章、第三章、第五章和第六章由沈本荫编写；第一章、第四章和第八章由大连铁道学院叶家金教授编写；第七章、第九章和第十章由上海铁道学院郑水应副教授编写。北方交通大学金新民副教授对书稿提出了宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，诚恳希望读者批评指正。

编者

1995 年 8 月

目　　录

绪　　论…… 1
第一节　交流调速传动系统的基本类型…… 2
第二节　交流电动机的调速方式…… 2
第三节　交流变速传动的应用领域…… 8
第四节　交流传动技术的发展方向 …… 11
第一章　交流传动系统的能量转换电路 …… 16
第一节　电力半导体器件及其发展趋势 …… 16
第二节　晶闸管构成的基本电路 …… 21
第三节　GTO 构成的逆变电路、门极电路及吸收电路 …… 42
第四节　GTR 构成的逆变电路、基极驱动电路及吸收电路 …… 52
第五节　IGBT 构成的逆变电路 …… 64
第二章　变频调速异步电机的控制方式 …… 70
第一节　频率调节时异步电机的等值电路及转矩表达式 …… 70
第二节　恒电压频率比控制 …… 72
第三节　恒磁通($E_s/f_s=$ 常值)控制 …… 74
第四节　恒电流运行方式 …… 76
第五节　恒功率运行方式 …… 77
第六节　最小损耗运行方式 …… 79
第七节　恒最大转矩运行方式 …… 82
第八节　各种控制方式的调节特性及转矩特性 …… 83
第三章　变频调速系统异步电动机的数学模型 …… 86
第一节　原型电机的统一理论 …… 86
第二节　坐标变换和变换矩阵 …… 90
第三节　三相异步电机的数学模型 …… 98
第四节　异步电机在静止坐标系(D、Q、0)上的数学模型…… 101
第五节　异步电机在两相同步旋转(M、T)坐标系的数学模型 …… 105
第六节　异步电机在对称分量(P、N、0)轴系的数学模型 …… 106
第七节　异步电机的状态方程及线性化方程…… 108
第四章　逆变器的 PWM 控制…… 112
第一节　PWM 控制的基本原理 …… 113
第二节　SPWM 控制模式及求解方法 …… 117
第三节　谐波消除法的 PWM 控制…… 120
第四节　磁通轨迹法的 PWM 控制…… 122

第五节　大规模集成电路的 PWM 控制…… 125
第五章　异步电动机变频调速控制系统…… 129
第一节　电压型逆变器—— 异步电动机转速开环系统…… 129
第二节　电流型逆变器—— 异步电动机转速开环系统…… 134
第三节　转速闭环、转差频率控制的调速系统 …… 137
第四节　变频调速电流跟踪控制系统…… 140
第五节　变频调速的变结构控制系统…… 144
第六节　自适应控制系统…… 149
第六章　矢量控制系统及直接力矩控制系统…… 153
第一节　异步电动机矢量控制的基本原理…… 153
第二节　矢量控制的基本方程…… 155
第三节　矢量控制系统的实现…… 158
第四节　矢量控制系统应用举例…… 163
第五节　电机参数变化对矢量控制的影响…… 169
第六节　矢量控制的解耦性质…… 171
第七节　磁场定向控制的传函及框图…… 177
第八节　直接力矩控制的基本原理…… 180
第九节　直接转矩控制系统的结构框图…… 187
第七章　系统动态稳定性…… 190
第一节　概　　述…… 190
第二节　电压型逆变器动态稳定性分析…… 191
第三节　电流型逆变器动态稳定性分析…… 201
第八章　自控变频同步电动机调速系统…… 208
第一节　基本工作原理…… 208
第二节　无换向器电动机的基本特性…… 212
第三节　无换向器电机的控制系统…… 216
第九章　串级调速系统…… 222
第一节　串级调速原理及其分类…… 222
第二节　串级调速系统的特性…… 227
第三节　串级调速系统的能量指标…… 235
第四节　具有双闭环控制的串级调速系统…… 241
第五节　串级调速系统的参数计算…… 244
第十章　微型计算机在变频调速系统中的应用…… 249
第一节　概　　述…… 249
第二节　微机与专用芯片混合控制的 SPWM 变频调速系统 …… 253
第三节　微机生成 SPWM 控制脉冲的交流电动机变频调速系统 …… 263
第四节　微机控制的交流电动机变频调速系统…… 269
参考文献…… 274

绪　论

在工业、农业、交通运输、军事设施及日常生活中，广泛地应用着电力传动。如果运转机械由直流电动机驱动，则称为直流电气传动系统，如果运转机械由交流电动机驱动，则称为交流电气传动系统。

根据负载对象的运行要求，电气传动可分为恒速系统和调速系统。由于调速系统在技术性能及经济指标方面具有很多优点，所以，它在传动系统中得到了广泛的应用。

调速的目的或者是为了改进传动性能、满足工艺要求、提高产品质量（例如冶金、造纸、机床设备及牵引车辆），或者是为了减少损耗、提高效率、节约能源（如风机、水泵、压缩机等一类负载），有时也为了满足某些大容量、高转速的特殊需要。

长期以来，在调速传动的生产领域内，大多采用直流电动机传动系统，因为直流电动机的磁场电流和电枢电流可以独立控制，其起动、调速性能和转矩控制特性都比较理想，并容易获得良好的动态响应。

但是，直流电动机在结构上存在接触式的机械换向器，它不仅工艺复杂、价格昂贵，而且在运行中很容易产生换向火花和发生环火故障。另外，由于换向问题的存在，要求电动机各换向片之间的电压不能过高，这样，使得直流电动机的设计容量和高速时的利用功率都受到限制。例如，电力机车通常采用的直流串励电动机，虽然其调速性能优越，但其高速利用功率只能达到额定功率的 70%，单电机的设计容量也很难超过 1000kW。目前工业上用的直流电动机，即便转速可以达到 3000r/min，但电动机容量只有 400kW 左右，远远不能适应现代生产向高转速、大容量化方向发展的要求。

三相交流电动机，特别是鼠笼型异步电动机，由于其转子上没有机械换向器和没有带绝缘的绕组，不存在换向火花和环火现象等问题，因此，它的结构简单、惯量小、运行可靠，可以更高的转速运转。但交流电动机调节速度比较困难，至今绝大部分都是应用在恒速运转的场合。

异步电动机调速方法基本上可分为变极调速、变转差调速和变频调速三类。其中变极调速是有级调速，只能得到三四个速度级；变转差调速并不能改变电动机的同步速度，故其调速范围是很有限的，同时还存在损耗大、效率低的缺点；变频调速与前两种方法有着本质的不同，它是通过改变电源的供电频率 f_s 来改变转速 ω 以达到调速的目的，在调速范围内无论是低速区还是高速区，都能保持很小的转差率，因而具有效率高、调速范围广、调节精度高等优点。

在本世纪 30 年代，人们已经认识到变频调速是交流电动机一种最理想的调速方法。但是为了改变供电频率，它需要一套变频电源。过去采用的旋转变频机组或离子变流器，由于设备笨重庞大，可靠性差，故变频调速技术的发展很缓慢，真正投入实际运行的装置尚不太多。

60 年代，随着电力电子技术的发展和变频调速装置的研制成功，交流调速方法重新受到人们的重视，成为电动机调速的发展方向。

70 年代中期，在世界范围内出现了能源危机，节约能源成为人们关注的问题。许多过去一般不调速的传动装置，如风机、水泵等类负载，为了减少无谓的电能损失，也都采用了调速传

动。由此,对交流电动机调速技术的发展起了很大的推动作用。

80 年代以来,随着电力电子器件和微电子技术的发展,以及现代控制理论和控制技术的应用,交流传动调速技术取得了突破性的进展,逐步具备了调速范围宽、稳速精度高、动态响应快以及可作四象限运行等优良的技术性能。

目前,交流传动已经作为一种完全肯定的系统,正大举进入电气传动调速控制的各个领域。容量从数百瓦的伺服系统到万千瓦级的大功率系统,从工业传动到机车牵引;从单机传动到多机协调运转,调速范围达到 1∶ 10 万以上,调速精度可达 10^{-4}级。许多国家已实现了产品的系列化,而逐步取代直流调速系统。

第一节　交流调速传动系统的基本类型

一个完整的交流传动系统主要由三部分组成:电力变换器、交流电机和控制系统。从选用电动机的类型来看,交流传动系统可分为同步电动机调速系统和异步电动机调速系统两大类。

同步电动机调速系又可分为两种:一种是由变频电源供电,靠改变电压频率而改变其同步转速;另一种也是由变频电源供电,但需要附加一个转子磁场位置检测器构成自调频(同步)反馈控制系统,它也称为晶闸管同步电动机。对异步电动机而言,实现调速的方法很多,从主电路构成方式和控制技术来看,有用晶闸管电路控制加于电动机定子绕组的电压——调压调速;用控制附加在转子回路的电势并将转差功率反馈到电网——串级调速;以及用变频装置控制电机的电压和频率——变频调速。交流电动机调速方式的基本类型如下所示。

交流调速电动机
- 异步电动机
  - 鼠笼式
    - 定子电压控制
      - 不可逆
      - 可　逆
    - 定子电压和频率控制
      - 交交变频器
        - 他励式
        - 自励式
      - 交直交变频器
        - 电压型
        - 电流型
  - 绕线式
    - 定子电压控制
      - 不可逆
      - 可　逆
    - 转子功率控制
      - 电阻控制
      - 串级调制
    - 频率控制
      - 交交变频器
        - 他励式
        - 自励式
      - 交直交变频器
        - 电压型
        - 电流型
- 异步电动机
  - 无换向器电动机——电枢电压控制
    - 交流式
    - 直流式

第二节　交流电动机的调速方式

交流电动机的调速方法很多,根据所选用的电力变换器的不同类型和被调速交流电机的不同类型,目前较适用的有以下几种:

一、异步电动机调压调速

图 0- 1 所示的原理构成了异步电动机调压调速系统。电源为恒压恒频的三相交流电网 CVCF, 经电力变换器后输出为变压恒频交流 VVCF, 即 $f_s = f_1$, $U_s = f(\alpha)$。电力变换器可以采用相位控制、扇形控制或交流斩波控制。图 0- 2 给出了端压为参变量时的转矩转速特性。图

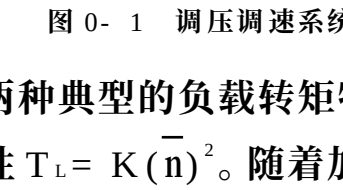


图 0- 1 调压调速系统原理图

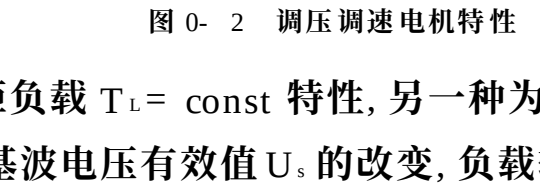


图 0- 2 调压调速电机特性

中画出了两种典型的负载转矩特性, 一种为恒转矩负载 $T_L = \text{const}$ 特性, 另一种为风机水泵类的负载特性 $T_L = K(\bar{n})^2$。随着加在电机定子上的基波电压有效值 U_s 的改变, 负载转矩曲线 T_L 与电机转矩曲线 T 的交点(稳定运行工作点)也不断改变, 电机的转差率 s 随着改变, 电机的转速相应地得到了调节。在电机转矩特性中, 电机的转差率定义为

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = 1 - \bar{\omega} = 1 - \frac{n}{n_0} = 1 - \bar{n} \qquad (0-1)$$

式中 n_0 —— 电机的同步转速, 由定子旋转磁场电气角速度 ω_0 确定, 即 $n_0 = 60\omega_0/2\pi n_p$;

n —— 电机的实际转速, 由运行中的实际电气角速度 ω 确定, $n = 60\omega/2\pi n_p$。

当采用调压调速时, 电机定子旋转磁场的速度 ω_0 和电机理想空载时同步转速 n_0 并不改变, 如果电磁转矩为 T, 则电机最大可能的理想效率是

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_e} = \frac{T\omega}{T\omega_0} = 1 - s \qquad (0-2)$$

式中 P_e —— 电网输入的电磁功率;

P_{mech} —— 输出的机械功率。

由式(0- 1)和式(0- 2)可看出, 随着转速的下降, 转差率 s 增大, 传动系统的效率直线下降, 其转差功率 sP_e 全部作为发热损耗掉了。从节能的观点看, 调压调速是一种耗能的调速方法, 不适于长期低速运行。但是由于这种方法比较简单, 设备价格比较便宜, 它还是广泛用于一些调速范围不大、低速运行时间不长、系统容量较小的场合中。例如, 对于只有短时低速运行的起重机械、升降机等恒转矩负载和小范围节能调速的风机、泵类负载都可采用, 也可用来兼作鼠笼型电动机的降压起动设备。

二、绕线式异步电动机的串级调速

如果交流电机为绕线式异步电动机, 定子绕组电路由恒压恒频 CVCF 的三相交流电网供电, 而转子电路采用间接变频器或直接变频器, 变频器通过变压器再和三相电网相连接, 则构成了异步电动机的串级调速系统, 如图 0- 3 所示。

在串级调速系统中, 定子旋转磁场的同步速度是不变的, 这和调压调速系统相同, 都属于

改变转差率 s 来调节转速的。但串级调速在于转子速度降低后的转差功率不是无效地以发热的形式损耗掉,而是把这个转差功率经过与转子连接的整流逆变电路变为交流电能而返回电网。由电机原理及半导体变流技术有关分析可知,电动机转子感应相电势为

图 0- 3　串级调速系统原理图

$$E_r = E_{ro}S \tag{0-3}$$

转子整流器输出电压 U_d 为

$$U_d = 2.34(E_{ro}s)\cos\alpha - \Delta U_d \tag{0-4}$$

有源逆变电路逆变电压 U_β 为

$$U_\beta = 2.34E_\beta\cos\beta + \Delta U_\beta \tag{0-5}$$

式(0- 3)～式(0- 5)中

E_{r0}——电动机静止时转子开路相电势;

E_β——逆变电路交流侧(逆变变压器副边)额定相电势;

$\cos\alpha$——整流器控制角 α的余弦函数;

$\cos\beta$——逆变器控制角的余弦函数;

ΔU_d——与转子参数有关的阻抗压降;

ΔU_β——与逆变变压器参数有关的阻抗压降。

因 U_d 与 U_β 近似相等,则联解式(0- 4)和式(0- 5),可得 $s = f(\alpha, \beta)$ 的函数关系。该函数关系说明了在串级调速系统中,只要调节 α角和 β角的大小,就可以调节电机的转差率,从而调节电动机的转速。

串级调速系统按其运行的速度范围可分为次同步串调系统(低于旋转磁场同步速度)和超同步串调系统(高于旋转磁场同步速度)。在图 0- 3 中,如果变流器(Ⅰ)工作在三相可控整流器状态,而变流器(Ⅱ)工作在逆变器状态,这就决定了转差功率只能从电机转子经整流——逆变反馈到电网中去,由于 $s \geq 0$,因此转速标么值 $\bar{n} = 1 - s \leq 1$,这时电动机只可能在低于同步速度下运行。如果改变角 α和角 β使变流器(Ⅱ)工作在整流状态,而变流器(Ⅰ)工作在逆变状态,那么,电机的转子将接受来自变压器的交流功率,这相当于转差功率变负,转差率 s 为负值,因而电动机转速 $\bar{n} = 1 - s > 1$,则电机将在高于同步速度下运行。

从系统的能量指标来看,由于串调系统利用了转差功率,所以它具有较高的运行效率。在图 0- 3 所标注的能量流图中,各部分功率的关系如下:

$$P_e = P_1 - (p_{sFe} + p_{sCu})$$

$$P_{mech} = P_e(1 - s)$$

$$P_{es} = P_e s \qquad (0-6)$$

$$P_i = P_1 - P_\beta$$

$$P_\beta = P_{es} - p_\Sigma$$

式中 P_1——输入电机功率;

P_i——电网输入串调系统功率;

P_e——电磁功率;

P_{es}——转差功率;

P_{mech}——输入机械功率;

P_β——逆变器向电网反馈功率;

p_{sFe}、p_{sCu}——定子铁耗和铜耗;

p_Σ——逆变器回路各部分损耗。

串调系统的效率为

$$\eta\% = \frac{P_{mech}}{P_i}100\% = \frac{P_e(1-s)}{P_e(1-s) + p_{sCu} + p_{sFe} + p_\Sigma}100\% \qquad (0-7)$$

从式(0-7)看出,由于 p_{sCu}、p_{sFe}和 p_Σ只占传递功率的很小部分,且对运行转速高低影响不大,因此,串调系统有较高的运行总效率(大容量系统效率可达 90% 以上),有明显的节能效果。

在串调系统中,由于逆变变压器需吸收无功功率和产生电流波形畸变,以及转子整流电路存在的换向重叠现象等影响,使得整个系统的功率因数较低,因此,当系统容量较大时应考虑同时采取改善电网功率因数的措施。

串级调速与其他如变频、无换器电机等交流调速系统相比,其控制结构简单、运行安全可靠、易于维护检修。

三、鼠笼型异步电动机的变频调速

由电机学原理可知,异步电动机的转速为

$$n = \frac{60f_s}{n_p}(1-s) \qquad (0-8)$$

转差率 s 为

$$s = \frac{f_s - f_r}{f_s} = \frac{f_{sl}}{f_s} \qquad (0-9)$$

式中 f_r——转子旋转频率;

f_{sl}——转差频率。

由式(0-8)和式(0-9)可知,如果在变频调速时使 f_{sl}与 f_s 线性变化,即保持 s 不变,则转速 n 与定子频率成正比变化,因此,变频调速是异步电动机一种最理想的调速方法。另外变频调速是通过调节定子频率 f_s、改变旋转磁场的同步速度来调节转速度的。在调节过程中,转差功率变化不大,因而也是一种高效的调速方法。

异步电动机采用变频调速不仅能无级调速,而且能根据负载的不同特性,通过适当调节电压与频率之间的关系,使电动机获得最佳的稳态特性,并具有良好的动态性能。异步电动机采

用变频起动,能大幅度降低电机的起动电流,增加起动转矩,显著改善起动性能。

变频调速系统需要一个能满足电机运行要求及频率可变的电力变换装置,该变频装置的电路结构有许多种类,对电机的特性有不同的影响。

根据能量变换的形式不同,电力变换装置可分为间接变换装置和直接变换装置,前者称为交- 直- 交(AC- DC- AC)变频器,后者称为交- 交(AC- AC)变频器。

AC- DC- AC 变频器的电路结构如图 0- 4 所示。它由电源侧整流器 R 和电机侧逆变器 I 两部分组成。恒压恒频(CVCF)先经可控整流得到可变的直流电压,再经逆变而得到变压变频(VVVF)的交流电,中间直流电路保证了两侧变流器(整流和逆变)能够在互不干扰的情况下工作。

图 0- 4 变频器

根据中间直流回路储能元件的不同,AC- DC- AC 变频器的特性又可分为电压源(型)和电流源(型)两大类。如果中间回路并接较大的电容 C 作为储能元件,如图 0- 4(a)所示,那么这个电源的等效输出内阻抗很小,输出电压比较稳定,不受负载大小性质的影响,故称为电压型变频器。电压型变频器比较适用于多台电动机并联运行和协同调速的‘群控’系统,如化纤工业的纺织机械和冶金行业的多机传动系统。由于中间直流环节采用大电容储能,输出电压调节速度慢,系统的动态响应较差。普通电压型变频器的另一主要问题是它不能适应电动机四象限运行的要求,不能实现再生制动。电流型变频器正好和电压型变频器相对应,在它的直流中间回路串接一个大的电感 L 作为储能元件,如图 0- 4(b)所示。它的等效内阻抗比较大,输出电流比较稳定,出现过电流的可能性较小,由于中间回路大电感的存在,逆变器中的晶闸管不易发生直通故障,即使发生短路故障或换流失败,也容易受到保护。电流型变频器的最大优点是容易实现电动机的再生制动运行,特别适用于要求频繁起动、制动和正反转四象限工作的变速传动。但是异步电动机在电流型逆变器供电下,其运行稳定性较差,通常需要采用闭环控制和动态校正。目前采用的晶闸管电流型逆变器,由于电机漏感参与换流,换流速度较慢,故系统的最高频率较电压型逆变器为低。另外,开关元件和电动机绕组在换流过程中,伴随有换流脉冲电压出现,要抑制这种换流瞬间过电压,需要附加过电压吸收装置。

无论是电压型变频器或者电流型变频器,其技术已完全成熟。近年来,由于具有自关断能力的元件发展迅速,逆变器广泛采用了高频脉宽调制(PWM)技术,电压型逆变器的优势比较明显,应用范围较广,特别是中小型电动机通用的功率晶体管变频装置,一般均为电压型逆变器。而电流型逆变器较多地用于容量较大的晶闸管闭环变频调速系统。

AC- AC 变频器系统原理如图 0- 5(a)所示,它无中间直流环节,而是直接把电网频率的交流电变换为较低频率的交流电。变换器的电路结构如图 0- 5(b)所示。它是由接到同一交流电源上的若干个相控变流器(半波电路或桥式电路)所组成,只要按照一定的规律控制各相控

变流器的控制角,使变流器工作在整流状态或逆变状态,则交- 交变频器的输出端就可以得到由多相整流波的包络线所组成的较低频率的交流电。

由于该变频器只有一次转换能量,电路损耗小,变换效率高。由于电路采用了交流电网电压过零获得自然换流,故换流可靠,过载能力强,而且可以不必使用快速关断晶闸管,系统中省去了强迫换流所需的电容、电感元件。另外,只要调节变流器组的控制角,就能快速地实现四象限运行的转换。

图 0- 5 AC- AC 变频器

但是,AC- AC 变频器随着输出频率的提高,电压和电流波形畸变增大,其输出最高频率不能超过电源频率的$\frac{1}{2}$,只能用于低频(低速)大容量的传动系统。此外,这种变频器电路中所用的开关元件较多,控制系统也比较复杂。

近年来,变频装置多重化技术的进展,微型计算机控制技术的发展以及可关断元件的应用,在简化控制系统、改善电压波形和提高输出频率等方面,正在促进 AC- AC 变频器的进一步发展。

四、自调频同步电机调速

这种调速系统是由变频器、同步电机、转子位置(磁场相位)检测器和相应的控制系统所组成。变频器可以是 AC- AC 直接变频器,也可能是 AC- DC- AC 间接变频。前者称交- 交型无换向器电机调速系统(简称交流式),后者称交- 直- 交无换向器电机调速系统(简称直流式)。图 0- 6 所示的是交- 直- 交系统的原理框图。

在自调频同步电机调速系统中,转子位置检测器 PS 是联系同步电机和变频器之间控制系统的随动环节。由 PS 测出转子磁场 F_0 的相对位置,并发出相应的触发信号,经逻辑分配和放大后,去控制变频器的开关元件,使同步电机对应相获得电流并产生电枢磁势 F_a,当电枢磁势 F_a 和转子磁势 F_0 在空间存在一定夹角时,电机将产生转矩而使电机运转。当电机转速发生变化时,PS 发出脉冲信号列的频率也改变,变频器的输出频率也随之改变。因此可知,这个系统的频率 f_s 是由电机本身的转速 n 决定的,故称为自调频同步电机调速系统。

图 0- 6 交- 直- 交自调频同步电机调速系统

从电机结构上看,自调频同步电机和普通同步电机完全一样,在稳定运行时,其感应电势

E 与气隙磁链 ψ_g 和频率 f_s 成正比。从系统工作原理上说，由于位置检测器和变频器一起代替了直流电机的换向器和电刷结构，系统又具有直流电机的调速特性，其端压正比于气隙磁链和转速。如果在电路上和在电磁关系上把两者联系起来，并考虑自调频电机的频率是由转速决定的条件，则可得到转速特性为

$$n = 4.08 \frac{\frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_s \cos\alpha - \sum IR}{n_p \psi_g \cos(\gamma - \frac{\mu}{2}) \cos\frac{\mu}{2}} \qquad (0-10)$$

式中 U_s——三相电网相电压有效值；

α——电源侧整流器输出电压控制角；

ψ_g——气隙磁链；

$\sum IR$——电路中等效压降；

γ——逆变器换流超前角；

μ——换流重叠角。

由式(0-10)可以看出，如果去掉分母上的余弦项，则自调频同步电机的调速特性和直流电动机完全一样。当负载电流一定时，电动机的速度调节可以通过改变控制角 α(即改变直流侧电压 U_d)和改变励磁电流来实现，它具有直流电动机良好的调速特性。

自调频同步电机调速系统结构简单、控制方便、易正反转运行，兼有直流电机特性优越和交流电机运行可靠等优点，较适用于大容量的交流调速传动系统。

第三节　交流变速传动的应用领域

近 20 年来，随着变流技术、控制理论和控制手段的发展，交流调速技术已趋于成熟，多种交流传动系统已进入了电气传动的各个领域，正广泛用于冶金传动机械、机床控制、风机水泵、牵引动力及其它工业部门。在工业传动和牵引动力领域中有如下几个应用方面。

一、工业传动系统

1. 在风机水泵机械中的节能应用

在风机水泵一类传动负载中，过去通常是采用恒速交流电气传动系统，当采用交流调速系统后，能把原来用挡板节流阀控制风量、流量的运行方式改造为调节电机转速的控制方式，能取得明显的节电效果。根据风机、水泵传动机械的负载特性，风量 Q 与转速 n 成正比，负载转矩 T_L 与转速平方成正比。当风机转速由 n 变到 n′ 后，风量 Q′、转矩 T_L' 与速转变化有以下关系。

$$Q' = Q(\frac{n'}{n}) \qquad (0-11)$$

$$T_L' = T_L(\frac{n'}{n})^2 \qquad (0-12)$$

则电动机的消耗功率 P 与转速的三次方成正比，即

$$P' = P(\frac{n'}{n})^3 \qquad (0-13)$$

图 0- 7 示出了风机负载调速节能的例子。这一类调速传动主要目的是节约能源,技术要求比较简单,可以采用较低挡的交流调速系统。

2. 在高性能、高精度传动机械上的应用

在钢铁生产线上,在进料和出料之间,要经过许多工艺处理工序(如卷放、拉紧、压延),并由不同作用的驱动辊驱动,这些驱动装置本身是要求调速传动的。各驱动装置之间,由于联动、同步或比例同步运转,因此,要求控制系统有较高的调节精度。采用交流变频调速系统,能够使生产线协调运行。当每一台驱动电机由一台逆变器供电并采用矢量控制系统时,其单机频率f (或转速)的调节精度能达到 0. 1%。系统不仅能以快速响应来确保加减速或恒速运行时的稳定性,而且能以高精度的转矩控制来确保材料的张力,达到高性能、高精度的要求。另外,在化纤、纺织等机械传动的调速系统中,为了提高产品质量,对调速系统同样有高性能和高精度的要求,它们可以用一台电压型变频调速器向多台电动机供电,能获得明显的技术经济效果。最近,这些方面的应用实例正在不断增加。

图 0- 7 风机负载运行特性

3. 在高速度、宽调速传动机械上的应用

在机床一类加工机械的传动系统中,无论是工具旋转或工件旋转哪种形式,为了提高切削精度、增加工效以及延长刀具使用寿命,保持恒线速度切削是最佳运行模式。因此,要求传动系统能在很宽的速度范围内(1∶ 100～200)调速,宽调频的交流传动系统可以满足恒线速度控制的要求。图 0- 8 所示为这种运行方式的一个例子。在工件大直径部分转速较低,而在工作小直径部分则要求高转速运行。当工件直径按锥形变化时,传动轴的速度则要求连续平滑的变化。适合于高速度、宽调速范围传动系统的变频器,目前已有系列产品,它们大多数是由大功率晶体管(GTR)构成的电压型逆变器,输出频率范围为 0～200Hz,最高频率可达 400Hz,其性能能够满足恒线速度控制,并实现了高速恒功率运转。

4. 在快响应传动机械上的应用

所谓快响应系统,是指实际速度对于速度指令的变化跟踪得快,或者是从急剧负载变化引起的过渡性速度变化中恢复得快的系统,这类负载如轧钢机、冲孔机等。采用逆变器转差闭环的控制以后,系统能够达到快速响应的要求。例如对于阶跃的速度指令,其响应时间 t_s 能够达到小于 0. 1s,如图 0- 9 所示,即能做到速度以 0. 1s 跟踪。而对于冲击负载(阶跃负载变化)速度变化(冲击降落)的恢复时间 t_r 约为 0. 1～0. 2s,如图 0- 10 所示。

图 0- 8 工件形状与运行模式

二、机车牵引系统

机车牵引作为电气传动的一个单独类别,过去一直采用直流电动机牵引或脉流(经整流器供电)电动机牵引。近 20 年来,由于电子技术尤其是大功率变流技术的发展、控制理论和控制技术的完善、以及静止变频器研究技术的成熟,使三相交流电动机(异步电动机和无换向器同

步电动机)在机车牵引中的应用得到了关键性突破,获得了极为迅速的发展。

三相交流异步电动机牵引有着显著优越的技术经济指标。一般说来有以下优点:

图 0- 9　速度控制系统的阶跃响应

图 0- 10　冲击负载的降落响应

(1)有良好的牵引性能

合理地利用系统的调压、调频特性,可以实现宽范围的平滑调速,使机车的高速利用功率 K_p= 1,恒功率调速比 K_n= 2。另外,调节调频特性能使机车起动时发出较大的起动转矩。

(2)电网功率因数高、谐波干扰小

在交- 直- 交电力机车上,其电源侧变流器可以采用四象限调节变流器(4qs),它通过 PWM 斩波控制方法,可以调节电网输入电流的相位,使所取电流接近正弦波形,并能在广泛的负载范围内使机车的功率因数近于 1,这在减小对通讯信号的谐波干扰方面和充分利用电网的传输功率方面都有很大的意义。另外,四象限变流器能很方便地实现牵引和再生之间的能量转换,能取得显著的节能效果。

(3)功率大、体积小、重量轻、运行可靠

由于异步电动机转速可达 4000r/ min,由于利用了换向器电机换向器所占的空间,所以交流电机能够做到功率大、重量轻。与带换向器的直流(脉流)电动机相比,其单位重量千瓦(kW/ kg)是直(脉)流电机的三倍。在机车车体提供的空间范围内,异步电动机的功率可以达到 1400～2000kW。另外,交流电动机没有换向器和电刷装置,机车主电路系统又可以省去许多有触点电器,因此,运行可靠性可以进一步提高。

(4)动态性能和粘着利用好

由于交流异步电动机有较硬的自然特性,其防空转(机车粘着利用)性能较好。当机车轮对发生空转(粘着破坏)时,牵引力会急剧下降,使粘着牵引力很快恢复。经过近十年的研究,机车牵引控制已用矢量控制或直接力矩控制取代了滑差—— 电流控制。这些控制技术,不仅能使系统稳态精度高,而且能获得高的动态性能,可以使牵引力沿着轮轨之间蠕滑极限进行控制,极适合于当代机车高速、重载牵引的要求。

三相交流传动用于机车动力牵引是从 70 年代开始的。1971 年原西德研制了第一批 DE2500 型交流传动内燃机车,经试运行后,证实了三相交流机车的一系列重大优点:如牵引力大、粘着利用好、制动性能优越、以及维修量小等。从而掀起了研究三相交流机车的热潮。1980 年,原西德又将第一批 E120 型交流传动干线电力机车投入运行,这是交流传动机车发展史上的一个重要里程碑。近年来,已有多种型号的三相交流电力机车、交流电传动内燃机车和高速电动车组,分别在德国、法国、美国、丹麦、挪威、瑞士、瑞典、意大利、奥地利、西班牙等国铁

路线上运行。从世界范围内看,目前三相交流传动机车的技术研究中心在西欧,如 ABB 电气集团和西门子电气集团(主要发展电压型异步电动机传动技术),法国阿尔斯通电气集团(主要发展电流型同步电动机技术)。日本在 1990 年也研制成功了 EF500 型双流制交- 直- 交电力机车样机和新干线 300 系列的交- 直- 交高速电动车组。

在发展的交流电传动机车中,德国 E120 型交流传动机车在技术上是较为成熟的一种。该型机车为 4 轴型异步电动机驱动,机车功率 5600kW(每个电机功率 1400kW),主电路采用电压型二点式McMurray电路、PWM方式控制,电源侧为四象限变流器,功率因数能达到 0.99,逆变器由 2800V 中间直流电压供电,产生变压变频的三相交流电压。在起动范围内,逆变器按 PWM 方式控制,当输出频率达到 60Hz 时,转为方波控制区。该机车采用转差频率控制,在恒磁通运行条件下,T(力矩)$\propto f_{se}$(转差频率),只要恰当地控制 f_{sl}随 f_s 的变化规律,就能使电动机在每个速度点发出所要求的力矩。另外瑞士联邦铁路发展的 60 型 4 轴电力机车,最大功率 6100kW,最高速度 260km/h,主电路采用 GTO 元件,逆变器由电压型三点式构成,系统采用矢量控制模式,并由微机进行控制,该机车牵引力较大,是西欧重载牵引的典型用例。为了大力发展三相交流传动,在西欧目前已经停止了传统的相控脉流电力机车和直流电动机传动的内燃机车的生产。

自 70 年代开始,我国许多科研单位已着手进行电力半导体变流技术和三相交流传动的研究,容量从几千瓦逐渐扩大,到 1989 年交流传动系统的容量已达到 300kW 以上。与此同时,铁道部门的有关科研机构也在进行三相交流传动机车的研究,到 1992 年已经完成了单机容量为 1000kW 级的地面试验系统。其技术性能是:

(1)主电路是由 KK(快速晶闸管)元件构成的交- 直- 交电路,中间回路直流电压 U_d= 2800V。

(2)电流侧整流器采用四象限脉冲整流器,其电源功率因数 λ接近于 1。

$$\lambda = P/S = \xi\cos_1 \approx 1$$

式中 P —— 有功功率;

S —— 视在功率;

ξ—— 波形畸变系数;

$\cos_1$—— 基波分量的相位移系数。

(3)逆变器采用正弦波中间 60 度的脉宽调制,三相电压对称度较好。

(4)输出频率为 0.5～140Hz,可调电压为 0～2200V 三相交流电压。

(5)控制方式为恒力矩(U/f ≈const)起动区和恒功率运行区,两者在额定速度点转换。在恒力矩区段逆变器按 PWM 方式工作,恒功率区段逆变器输出电压保持恒定。

(6)系统设置的中间直流过电压保护和逆变器的过电压保护及短路保护。

根据‘地面试验系统’研制取得的数据和经验,目前正在进行功率为 4000kW 级 4 轴的三相交流电力机车的研究。

第四节 交流传动技术的发展方向

交流传动是一门跨学科的技术,它涉及到电力电子器件、变流器电路、交流电机、控制理论及微电子学在内的许多领域。经过近 20 年的发展,交流传动在工业及交通运输业中已开始得