

异步电动机

变频调速系统及其应用

邓想珍 赖寿宏 编著

GTR-SPWM

南京航空航天大学
图书馆
2001.11.11

2001.11.11

异步电动机变频调速系统及其应用

邓想珍 赖寿宏 编著

华中理工大学出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了异步电动机的变频调速基本理论和大功率晶体管正弦脉宽调制逆变器的工作原理。同时还详细介绍了开环变频调速系统、矢量变换控制闭环变频调速系统、异步电动机主轴变频调速系统和异步电动机伺服系统的硬件电路、控制算法及软件框图。最后，列举了交流变频调速系统的典型应用实例。

全书理论联系实际，它是作者多年研究成果的总结，同时介绍了国外变频装置，非常适合当前电力传动技术发展的需要。

本书可作为大专院校工业电气自动化专业的教材，也可供工厂、设计和科研单位从事电力传动自动控制的工程技术人员参考。

异步电动机变频调速系统及其应用

邓想珍 赖寿宏 编著

责任编辑 傅岚亭

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山) 邮码 430074

新华书店湖北发行所经销

武汉大学出版社印刷总厂印刷

*

开本：787×1092 1/16 印张：8 字数：180 000

1992年9月第1版 1992年9月第1次印刷

印数：1—6 000

ISBN 7—5609—0698—2/TP·69

定价：4.80元

(鄂)新登字第10号

前 言

过去,在要求快速、高精度的电力拖动系统中,都采用直流电动机拖动。这是因为直流电动机具有调速性能好,转矩控制方便,控制系统较简单等特点。但是由于直流电动机具有机械换向这一致命的弱点,致使直流电动机制造成本高,维护不便,使用环境受到限制,也限制了向高速、大功率方向发展。相对于直流电动机来说,交流电动机特别是异步电动机具有制造成本低,结构简单,坚固,运行可靠,维护方便,可适用于恶劣环境下工作,以及易于向高压、高速和大容量方向发展等一系列优点。因此,近一二十年来,世界各国都在致力于交流电动机传动系统的研究。交流传动系统的发展有赖于近代交流调速理论、半导体变流技术和控制手段的发展。具体说来:第一,转差频率控制、矢量变换控制和直接转矩控制等新的交流调速理论的诞生,使交流调速有了新的理论基础,发生了质的变化。第二,以GTR和GTO为代表的、可以说接近于理想的自控式大功率开关器件的制造成功,应用具有大电流、高电压、快通断、低损耗、易保护、小体积和模块化的特点的电力电子器件,制造出了体积小、性能优越的功率变换器,为交流传动装置奠定了基础。第三,微型计算机及微型计算机控制技术的发展,使交流调速系统的复杂的控制算法和控制方式得以实现,且使交流调速装置的性能价格比提高。目前,高性能的交流调速系统、伺服系统已经研制出来,正逐步地取代直流调速系统和直流伺服系统,这种发展趋势日益明显。

本书是适应交流变频调速系统的教学和在国内推广应用交流变频调速技术的需要而编写的。全书贯彻“理论与实践相结合”和“少而精”的原则,讲述异步电动机的变频控制。在简明阐述交流电动机变频调速原理和系统设计方法之后,着重介绍了以大功率晶体管正弦波脉宽调制逆变器为主电路所构成的异步电动机的开环、闭环、主轴变频调速和位置伺服系统。同时介绍了日本山肯、富士的最新开环变频器及应用实例。

本书共分五章。第一章介绍了交流变频调速的基本理论;第二章主要介绍采用大功率晶体管构成正弦波脉宽调制逆变器的基本原理及基极驱动、保护等电路的设计;第三章介绍了变频调速系统中常用的几种反馈信号的检测原理及方法;第四章介绍了交流异步电动机的几种变频调速系统(包括FUJI SANKEN公司)和位置伺服系统的硬件和软件框图;第五章主要介绍了变频调速系统的应用实例。

本书的绪论、第一、二、五章及附录由华中理工大学邓想珍副教授编写,第三、四章由华中理工大学赖寿宏副教授编写。

本书是在《新型交流变频调速系统》讲义的基础上修改、充实而成,是作者多年从事交流变频调速课程的教学和科研的经验总结。本书的出版应当感谢华中理工大学工业电气自动化教研室从事交流变频调速项目研究的陶绪楠副教授、秦忆副教授、邓忠华讲师、陈俊讲师以及胡亚光教授等的支持和帮助。专业生产交流变频器及数控装置的中外合资深圳锦江机电有限公司和武汉大江高技术应用研究所为本书的出版给予了热情支持,在此表示谢意。

本书承蒙华中理工大学陶醒世教授进行了全面的审阅,提出了许多宝贵的意见。作者在

此表示衷心感谢。

本书既可作为高等院校工业电气自动化专业及其相近专业的教材，又可供从事电力传动自动控制的工程技术人员参考。

由于作者业务水平有限，书中错误和不当之处在所难免，恳切期望同行专家和广大读者给予批评指正。

前 言

作 者

1992年3月

随着科学技术的飞速发展，电力传动系统的应用越来越广泛，中、小型交流传动系统的应用也越来越广泛。本书在编写过程中，参考了国内外许多文献，力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。本书可作为高等院校工业电气自动化专业及其相近专业的教材，也可供从事电力传动自动控制的工程技术人员参考。

本书共分五章。第一章介绍交流传动系统的基本概念、分类及应用；第二章介绍交流传动系统的数学模型及动态特性；第三章介绍交流传动系统的控制策略；第四章介绍交流传动系统的硬件结构及软件实现；第五章介绍交流传动系统的故障诊断及保护。

本书在编写过程中，参考了国内外许多文献，力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。本书可作为高等院校工业电气自动化专业及其相近专业的教材，也可供从事电力传动自动控制的工程技术人员参考。

本书共分五章。第一章介绍交流传动系统的基本概念、分类及应用；第二章介绍交流传动系统的数学模型及动态特性；第三章介绍交流传动系统的控制策略；第四章介绍交流传动系统的硬件结构及软件实现；第五章介绍交流传动系统的故障诊断及保护。

本书在编写过程中，参考了国内外许多文献，力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。本书可作为高等院校工业电气自动化专业及其相近专业的教材，也可供从事电力传动自动控制的工程技术人员参考。

本书共分五章。第一章介绍交流传动系统的基本概念、分类及应用；第二章介绍交流传动系统的数学模型及动态特性；第三章介绍交流传动系统的控制策略；第四章介绍交流传动系统的硬件结构及软件实现；第五章介绍交流传动系统的故障诊断及保护。

目 录

绪 论

- (1) 一、交流调速技术的发展概况及其特点..... (1)
- (2) 二、异步电动机常用的调速方案及其性能比较..... (2)
- (3) 三、变频调速系统中的电力半导体器件及变频器..... (3)
- (6) 四、交流变频调速技术的应用..... (6)

第一章 异步电动机变频调速系统的理论基础

- § 1-1 异步电动机的 $u/f=c$ 控制原则..... (7)
 - (7) 一、何谓 $u/f=c$ 的控制原则..... (7)
 - (8) 二、 $u/f=c$ 时, 异步电动机的机械特性分析..... (8)
 - (11) 三、 $u/f=c$ 控制方式的性能评价及应用场合..... (11)
- § 1-2 异步电动机的 $M_{\max}=c$ 控制方式..... (11)
 - (11) 一、何谓异步电动机 $M_{\max}=c$ 的控制方式..... (11)
 - (11) 二、按 $M_{\max}=c$ 控制方式运行时电压/频率的关系..... (11)
 - (13) 三、按 $M_{\max}=c$ 控制方式运行时, 低频时定子端电压的修正..... (13)
 - (14) 四、异步电动机开环变频调速系统框图..... (14)
- § 1-3 异步电动机的矢量变换控制..... (15)
 - (16) 一、异步电动机在静止的 A 、 B 、 C 坐标轴系中的数学模型..... (16)
 - (19) 二、异步电动机在旋转的 d 、 q 、 0 坐标轴系中的数学模型..... (19)
 - (22) 三、矢量变换控制原理..... (22)
 - (24) 四、坐标变换及坐标变换矩阵..... (24)
 - (26) 五、异步电动机矢量变换控制交流变频调速系统框图..... (26)
- § 1-4 异步电动机的弱磁控制原理..... (27)
 - (27) 一、异步电动机的弱磁控制原理..... (27)
 - (28) 二、弱磁控制时异步电动机的机械特性分析..... (28)
 - (28) 三、交流异步主轴变频调速系统框图..... (28)
- (31) 习题..... (31)

第二章 大功率晶体管正弦波脉宽调制变频器

- § 2-1 大功率晶体管..... (33)
 - (33) 一、内部结构..... (33)
 - (34) 二、主要参数..... (34)
- § 2-2 大功率开关晶体管的基极驱动电路..... (35)
 - (35) 一、GTR 对驱动电路的要求..... (35)

二、一种实用的 GTR 基极驱动电路	(35)
三、具有抗 GTR 过饱和功能的基极驱动电路	(36)
四、UAA4002 组成的基极驱动电路	(37)
§ 2-3 大功率晶体管正弦波脉宽调制变频器	(38)
一、变频原理	(39)
二、有关术语和基本概念	(39)
§ 2-4 单极性 GTR-SPWM 逆变器	(41)
一、工作原理	(41)
二、负载电流的流动路径及其切换	(41)
三、单极性 GTR-SPWM 逆变器输出电压的谐波分析	(42)
§ 2-5 双极性 GTR-SPWM 逆变器	(43)
一、工作原理	(43)
二、负载电流的流动路径及其切换	(44)
三、双极性 GTR-SPWM 逆变器输出电压的谐波分析	(44)
§ 2-6 大功率晶体管的导通时间与调制系数 k 的关系	(45)
一、单极性逆变器	(45)
二、双极性逆变器	(46)
§ 2-7 单、双极性 GTR-SPWM 逆变器的性能比较	(47)
一、相同点	(47)
二、不同点	(47)
§ 2-8 双极性 SPWM 变频器的设计	(48)
一、变频器中各个组成环节的设计	(48)
二、11.2kVA 双极性变频器设计举例	(50)
§ 2-9 磁通控制式正弦波 PWM 控制的逆变器	(52)
一、GTR 的工作模式	(53)
二、如何保证旋转磁场的轨迹为圆形	(53)
三、磁通控制方式正弦波 PWM 控制的特点	(54)
§ 2-10 大功率晶体管正弦波脉宽调制逆变器的保护	(54)
一、大功率晶体管二次击穿的保护	(54)
二、过电流保护	(56)
三、欠(过)电压保护	(57)
四、泵升电压限制电路	(57)
§ 2-11 正弦波脉宽调制 SPWM 波形的实现	(58)
一、载波(三角波)信号发生器	(59)
二、模拟电路产生 SPWM 波形	(60)
三、数字法产生 SPWM 波形	(61)
四、采用大规模集成电路 HEF-4752V 产生 SPWM 波形	(62)
习题	(64)

第三章 反馈信号的检测

§ 3-1 异步电动机定子电流的检测	(65)
一、直接检测式	(65)
二、磁场平衡式	(66)
§ 3-2 异步电动机定子电压的检测	(67)
一、光电耦合直接检测法	(67)
二、采用 LEM 电压传感器检测法	(67)
§ 3-3 异步电动机转速的检测	(69)
一、模拟测速法	(69)
二、数字测速法	(69)
三、数字测速的判向电路	(72)
四、数字测速电路实例	(73)
§ 3-4 位置检测	(77)
一、光电编码器	(77)
二、光电脉冲编码器	(78)
三、旋转变压器	(79)
习题	(81)

第四章 异步电动机变频调速系统

§ 4-1 异步电动机开环变频调速系统	(82)
一、对开环变频调速系统的要求	(82)
二、开环变频调速系统的组成	(82)
三、开环变频调速系统的工作原理	(83)
§ 4-2 异步电动机矢量变换控制变频调速系统	(87)
一、系统构成框图和工作原理	(87)
二、矢量变换控制运算环节	(88)
三、交流电流跟随控制环节	(89)
四、旋转的 2/3 变换电路	(89)
§ 4-3 交流异步主轴变频调速系统	(91)
一、交流异步主轴变频调速系统的组成	(91)
二、实现弱磁控制的方法	(92)
三、直接访问 EPROM 方案的控制软件	(94)
§ 4-4 异步电动机直接力矩自控 (DTS) 系统	(96)
一、控制原理	(96)
二、六边形及圆形磁链控制	(97)
三、六边形磁链轨迹控制的 DTS 系统框图	(97)
§ 4-5 异步电动机的位置伺服系统	(98)
一、转差频率矢量控制部分	(99)
二、位置环控制部分	(103)

§ 4-6 SAMCO-M 系列变频器	(107)
一、变频器的方框图	(107)
二、工作原理及特点	(109)
§ 4-7 FRENIC5000G7/P7 变频器	(109)
一、变频器的方框图	(109)
二、工作原理及特点	(110)
习题	(110)

第五章 交流变频调速系统的应用

§ 5-1 采用变频调速装置调节风机的风量、水泵的流量的节能原理	(111)
§ 5-2 变频调速系统用于水泵流量调节	(112)
§ 5-3 交流变频调速装置在恒压给水装置上的应用	(113)
§ 5-4 交流变频调速装置在高速磨床上的应用	(115)
习题	(115)

附 录

附录 I 单极性 GTR-SPWM 逆变器输出电压谐波分析	(116)
附录 II 双极性 GTR-SPWM 逆变器输出电压谐波分析	(117)
参考文献	(120)

绪 论

一、交流调速技术的发展概况及其特点

50年代末开始,电气传动领域进行着一场重要的技术变革——将原来只用于恒速传动的交流电动机实现调速控制,以取代制造复杂、价格昂贵、维护麻烦的直流电动机。随着电力半导体器件及微电子器件、特别是微型计算机及大规模集成电路的发展,再加上现代控制理论向电气传动领域的渗透,使这一变革逐步成为现实。

与直流电动机相比,交流电动机,特别是鼠笼式异步电动机具有结构简单、坚固耐用、很少维修、转动惯量小、制造成本低以及适用于恶劣工作环境等一系列优点。因此绝大多数电气传动系统采用交流传动方案,但是多用于恒速传动。需要变速传动的场合,仍然是直流电动机占据统治地位。

交流电动机调速性能差的原因之一是缺乏体积小而容量大的变频调压电源,问题的关键在于电力半导体器件的制造水平。随着电力电子技术的发展,特别是具有自关断能力的全控功率器件的不断推出,促进了交流变频技术的发展。加上微型计算机的出现,使老式变频电源存在的体积大、可靠性差等问题得到基本解决。目前,发达国家已有系列的变频电源产品出售,最大容量已突破万千瓦。例如,1984年SIMENS公司向DILLINGEN钢厂5.5米厚板轧机提供了一套 $2 \times 10920\text{kW}$ 同步机AC—AC变频矢量控制系统装置,其技术性能及经济指标已优于直流电动机传动。这足以说明电力电子器件制造业的重要性。

交流电动机调速性能差的原因之一是自身为一个多变量、高耦合、非线性的时变参数系统。电磁转矩很难直接通过外加信号准确控制。1971年,西德F. Blaschke提出异步电动机的矢量控制技术(或称为磁场定向控制技术),使异步电动机的调速技术取得了突破性进展。矢量控制技术的物理意义在于:由于异步电动机没有独立的励磁绕组,其励磁电流与产生转矩的有功电流全由定子电流提供,但若以转子磁通这一旋转的空间矢量为参考坐标,利用从静止坐标轴系到旋转坐标轴系之间的变换,则可以把定子电流中的激磁电流分量与转矩电流分量变成标量独立开来,进行分别控制。这样通过坐标变换重建的电动机模型就等效于一台直流电动机,从而可像直流电动机那样进行快速的转矩控制和磁通控制。目前,国外的矢量控制交流变频调速系统已在工程上得到广泛的应用。事物是不断发展的,改善交流电动机调速性能又出现值得关注的新动向。1984年,西德鲁尔大学Depenbrock教授提出了对交流电动机实现直接力矩控制的设想,即DSC法(direct self-control),也叫直接自控。按此方案构成的交流电动机变频调速系统的调速范围可达 $1:10000$,技术性能指标大大超过直流传动系统。它可取消矢量控制中的坐标变换电路,直接在定子坐标系中计算和控制电动机的磁通和力矩,实时控制气隙磁通矢量按圆形轨迹运行,使力矩响应时间限制在一个节拍以内,且无超调,动静态性能比矢量控制还好。这是一个大有发展前途的新的交流调速传动控制思想,值得足够重视。同期,日本学者Yoshihiyo Moorai提出了磁通轨迹控制原理,较好地解决了矢量变换系统中存在的问题,从而也说明现代控制理论的深入研究为交流电动机调速技术的发展起了决定性的作用。

纵观交流变频技术发展的全过程,可以看出交流变频技术如此迅速发展是依附于很多相

关技术的。原有电气传动控制的概念，已经不能充分概括现代计算机自动化系统中承担第一线任务的全部控制设备。1985年前后，国际上开始出现“运动控制系统”（motion control system）的提法，美国 B. K. Bose 博士写道：“当今的运动控制系统是一个新的领域，它包含着电机、电力半导体器件、变换器电路、作为硬件的信号电子技术、自动控制理论和微型计算机等众多学科。最近，又增添了甚大规模集成电路，以及复杂的计算机辅助设计技术。”这句话高度概括了交流调速技术的特点。

二、异步电动机常用的调速方案及其性能比较

由电机学知，交流异步电动机的转速公式如下：

$$n = \frac{60f}{p_1}(1 - s) \quad (0-1)$$

式中， f ——异步电动机定子电压供电频率； p_1 ——异步电动机的磁极对数； s ——异步电动机的转差率。

所以调节交流电动机的转速有三种方案。

（一）改变电动机的磁极对数

通过改接定子绕组的连接方式来实现。变极调速是改变异步电动机的同步转速

$$n_0 = \frac{60f_1}{p_1}$$

故一般称变极调速的电动机为多速异步电动机。

（二）变频调速

由式（0-1）看出，改变定子绕组的供电频率 f 是可以调速的。当转差率 s 一定时，电动机转速 n 基本上正比于 f ，很明显，只要有输出频率可平滑调节的变频电源，就能平滑、无级地调节异步电动机的转速。

（三）变转差率调速

改变转差率的办法很多，常用的方案有改变异步电动机的定子电压调速、采用滑差电动机调速、转子电路串电阻调速以及串级调速。前两种方法适合于笼型异步电动机，后者适合于绕线式异步电动机。这些方案都能使异步电动机实现平滑调速，但共同的缺点是在调速过程中存在转差损耗，即在调节过程中均产生大量的转差功率（ sP_M ）并消耗在转子电路中，使转子发热，系统效率降低。

在不计定子绕组铜耗条件下，变转差率调速系统最大可能的效率 η 定义为输出机械功率 P_{mech} 和输入电功率 P_s 之比，

$$\eta = \frac{P_{\text{mech}}}{P_s} = \frac{M_n \omega_r}{M_n \omega_1} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = 1 - s$$

式中， M_n ——电动机额定电磁转矩； ω_1 ——定子旋转磁场角速度； ω_r ——转子旋转角速度； ω_2 ——转子转差角速度。

当转速 $n < n_n$ （额定转速）时，转差率 s 增大，转差功率 $P_s = P_1 - P_{\text{mech}} = M_n \omega_2 = M_n \omega_1 \frac{\omega_2}{\omega_1} = sP_s$ 增大，以发热形式消耗在转子电路里，使得系统效率 η 下降。所以，通常将通过改变转子转差功率损耗来改变转差率 s 以调节速度的系统称为转差能耗型调速系统。要强调的是，绕线式异步电动机的串级调速系统已将转差功率通过整流和逆变作用，经变压器回馈到交流电网，没有以发热形式白白浪费能量，故不属转差能耗型调速系统。即使在低速时，串级调速系统

的效率也是很高的。

以上三种调速方案，变极对数 p 调速和变频调速属于改变同步转速 n_0 的调速方案，在调速过程中，转差率 s 是一定的，故系统效率不会因调速而降低。而变转差率调速属于不改同步转速的调速方案，存在着调速范围愈宽，系统效率 η 愈低的问题，故不值得提倡。在改变 n_0 的两种方案中，又因变极调速为有级调速，调速范围窄，且不连续，所以，目前在交流调速方案中，采用变频调速方案较多，本书只介绍交流变频调速系统，且以 GTR-SPWM 变频调速系统为重点。

三、变频调速系统中的电力半导体器件及变频器

任何一种变频调速系统，可用图 0-1 的框图来表示。它由变频器（或称变频电源）和控制单元组成，完成将恒压恒频（CVCF：constant voltage constant frequency）电源转换为变压变频电源（VVVF：variable voltage variable frequency），为交流异步电动机提供调速用的变频电源。

变频器又分电压型和电流型的 AC—DC—AC 变频器和 AC—AC 变频器。由电力半导体器件组成。下面分别介绍交流变频调速系统中常用的电力半导体器件及变频器。

（一）电力半导体器件

50 年代出现的晶闸管算是第一代的电力半导体器件，但其关断是不可控的。继而出现关断可控的全控式电力半导体器件，如大功率开关晶体管 GTR、可关断晶闸管 GTO、功率金属氧化物场效应晶体管 p-MOSFET 以及功率静电感应型晶闸管 SITH 等等。这些称为第二代电力半导体器件。由于电流/电压定额和开关速度的不同，每种器件各有其应用范围，图 0-2 表示各种器件构成的变频电源容量和开关频率的相应关系。由此可见，晶闸管组成的变频电源容量最大，但开关速度最慢；MOSFET 变频电源容量最小，但开关速度最高；GTO、GTR 变频电源介于二者之间。其各自的优缺点如下：

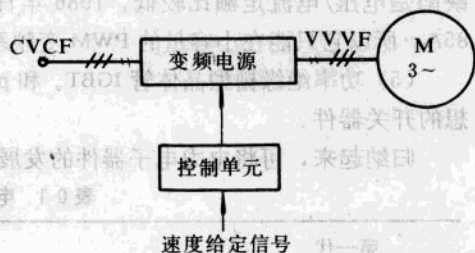


图 0-1 变频调速系统框图

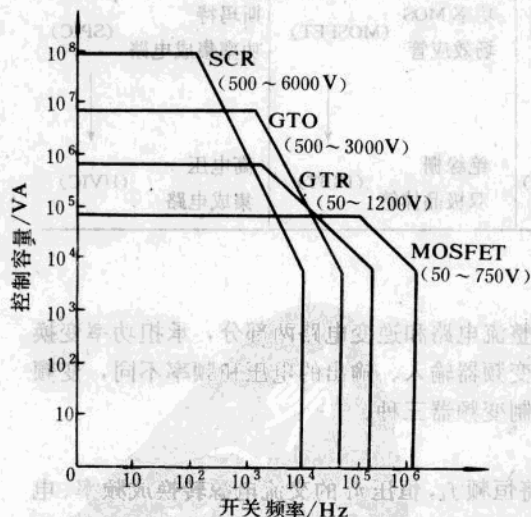


图 0-2 电力电子器件的适用范围

(1) 普通晶闸管 SCR 是最早出现的电力电子器件，电压/电流定额都比较高，是目前大容量变频电源广泛采用的开关器件，导通可控，关断是不受面板信号控制的，必须设置关断电路，这就造成变频装置结构复杂，开关频率比较低（约 300Hz 以下），故在大容量普通变频器中广泛采用。

(2) 可关断晶闸管 GTO 是由 SCR 派生出来的，与 SCR 不同点是 GTO 具有自关断能力，属全控器件，在变频器中采用 GTO 做开关元件，可省去关断电路，则可大大简化主电路。开关频率可比 SCR 高，GTO 变频电源的开关频率可达 100kHz。GTO 电力电子器件的缺点是关断增益 K_0 小， K_0 定义为阳极电流 I_a 与关断 GTO 用的最小门极电流 $I_{g,min}$ 之比

$$K_b = \frac{I_a}{I_{g, \min}} \leq 5$$

K_b 小, 造成 GTO 的驱动电路复杂。

(3) 大功率开关晶体管 GTR 是具有自关断能力的全控元件。饱和导通的程度完全取决于基极电流的大小, 基极电流为零, GTR 自行关断, 属电流控制器件。GTR 的优点是全控元件, 使变频电源无需设置换流关断电路, 从而使装置体积大大减小, 另外开关频率高, 特别适合于正弦波脉宽调制逆变器使用。缺点是 GTR 在使用中容易出现二次击穿, 故一定要设置阻容吸收电路, 使 GTR 在开关过程中承受较小的电压。

(4) 功率(电力)金属氧化物场效应管 p-MOSFET 也是全控器件, 具有自关断能力。与 GTR 不同的是属于电压控制器件, 它是靠栅极加正向控制电压形成的电场强度来改变导电沟道的宽窄, 实现栅极电压对漏极电流的控制, 而不是像 GTR 那样是利用基极电流大小来控制集电极电流的, 这样就使得 p-MOSFET 的驱动电路功率小, 开关频率更高, 开关时间仅为 0.01~0.03 μ s, 存贮时间几乎为零, 故工作频率可达几千万赫芝。由于漏极电流温度系数是负的, 不容易出现热点和二次击穿, 所以实际应用中 p-MOSFET 比 GTR 可靠性高。p-MOSFET 目前的缺陷是电压/电流定额比较低。1986 年日本 IR 公司开发出 p-MOSFET 的最大容量为 500V/85A, 所以它只能在小容量的 PWM 变频系统中使用。

(5) 功率绝缘栅型晶体管 IGBT。和 p-MOSFET 相近, 属于压控开关器件, 是一种比较理想的开关器件。

归纳起来, 可将电力电子器件的发展情况列于表 0-1 中。

表 0-1 电力电子器件发展简表

第一代 分立换流半控器件	第二代 功率集成自关断器件			第三代 功率集成电路
	电 流 控制型	电 场 控制型		
硅整流 二极管 (SR) ↓ 晶 体 闸流管 (SCR)	大功率 晶体管 (GTR) ↓ 可关断 晶闸管 (GTO)	静电感应 晶体管 (SIT) ↓ 静电感应 晶闸管 (SITH)	功率 MOS 场效应管 (MOSFET) ↓ 绝缘栅 双极晶体管 (IGBT)	斯玛特 功率集成电路 (SPIC) ↓ 高电压 集成电路 (HVIC)

(二) 变频器的基本类型

变频器是交流变频调速系统的主电路, 包括整流电路和逆变电路两部分, 承担功率变换以及功率放大任务, 由电力电子器件组成。根据变频器输入、输出的电压和频率不同, 变频器分为直接变频器、间接变频器和正弦波脉宽调制变频器三种。

1. 直接变频器

直接变频器又称 AC—AC 变频器, 其作用是将恒频 f_1 , 恒压 u_1 的交流电源转换成频率、电压幅值可调的 f_2 、 u_2 交流电能输出, 为交流异步电动机提供变频电源, 实现变频调速, 变频器框图如图 0-3 所示。直接变频器多半采用 SCR 组成, 近期也有采用 GTO 组成。以三相半波



图 0-3 直接变频器框图

直接变频器为例简单说明其工作原理 (图 0-4)。

以 A 相为例, 当 A 相的整流组工作时, 异步电动机 A 相得到的是正电压; 当逆变组工作时, 得到的是负电压; 只要控制三相反并联的桥组不断地处于整流和逆变工作状态, 就能将电网电压若干部分“拼凑”起来得到比电网频率低的变频电源, 输出电压波形如图 0-5 所示。由于电路是靠电网电压自然换流点换流, 故输出频率的最大值仅为电网频率的 $1/2 \sim 1/3$ 。特别适用于大容量、要求低速传动的场合。

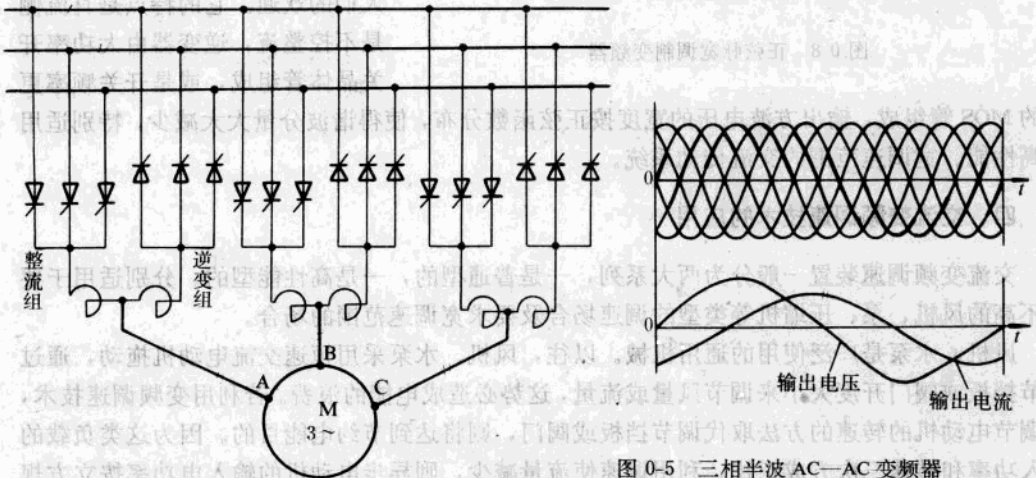


图 0-4 三相半波直接变频器

图 0-5 三相半波 AC-AC 变频器

输出电压波形

2. 间接变频器

间接变频器又称 AC-DC-AC 变频器。常用的间接变频器分为 AC-DC-AC 电压型变频器和 AC-DC-AC 电流型变频器。它们的共同点是先将交流电源整流成直流, 再由逆变器将

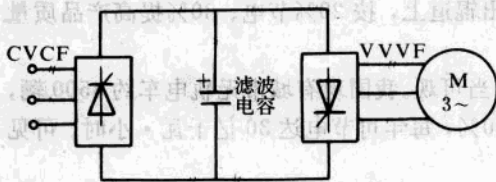


图 0-6 电压型变频器

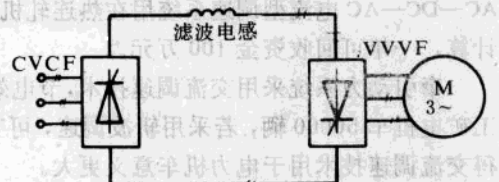


图 0-7 电流型变频器

直流转换成频率、电压可调的交流输出。电路原理图如图 0-6 和图 0-7 所示。二者的区别在于中间环节的滤波方式不同, 电压型采用电容滤波, 逆变器工作于恒压源状态。这类变频器特别适合于对多电动机供电, 如化纤工业的纺丝机中, 是多电动机同步运转的, 采用电压源型逆变器较合理。另外电压源型逆变器的直流侧没有能量回馈环节, 常用于不要求频繁启、制动的场合。

电流型变频器的中间滤波环节为大电感, 逆变器工作于恒流源状态。由于没有大的滤波电容, 直流侧的电压极性是容易改变的, 在保证电流方向一定时, 将逆变器工作于整流状态, 整流侧工作于逆变状态, 则很方便地使电动机实现四象限运转, 而不必附设能量回馈环节。另外, 由于电感电流不能突变, 故系统工作可靠性高。缺点是晶闸管在换流过程中要承受较高

的电压，故在选用电力半导体器件的电压等级时必须留有充分的余量。

正弦波脉宽调制变频器也属于电压型变频器，电路图如图 0-8 所示。

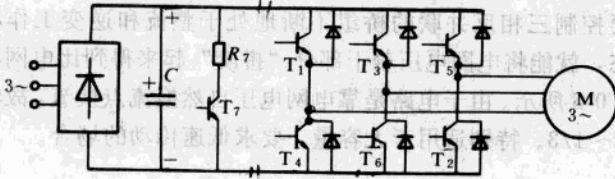


图 0-8 正弦脉宽调制变频器

由晶闸管组成的变频器，因开关频率低使输出电压谐波分量大，造成电动机低速时转矩脉动。随着第二代全控型功率器件的出现，正弦波脉宽调制变频器受到人们的欢迎。它的特点是直流侧是不控整流，逆变器由大功率开关晶体管组成，或是开关频率更

高的 MOS 管组成，输出方波电压的宽度按正弦函数分布，使得谐波分量大大减少，特别适用于高性能、宽调速范围的交流传动系统。

四、交流变频调速技术的应用

交流变频调速装置一般分为两大系列，一是普通型的，一是高性能型的。分别适用于要求不高的风机、泵、压缩机等类型的调速场合及要求宽调速范围的场合。

风机、水泵是广泛使用的通用机械。以往，风机、水泵采用恒速交流电动机拖动，通过调节挡板或阀门开度大小来调节风量或流量，这势必造成电能的浪费。若利用变频调速技术，以调节电动机的转速的方法取代调节挡板或阀门，则将达到节约电能目的。因为这类负载的输入功率和转速三次方成正比，利用调速使流量减少，则异步电动机的输入电功率按立方规律下降，从而使耗电量大大降低，节能效果十分显著，达 20% 以上。我国现有风机、泵类产品 1500 余万台套，年耗电量约占工业总耗电量的 40%，按节电 20% 计算，全年可节电达 85 亿千瓦·小时。

冶金行业中，交流调速技术多用于轧机主传动、输出辊道等。鞍钢半连轧厂将 200kVA AC—DC—AC 电流型调速系统用在热连轧机的输出辊道上，按 20% 节电、80% 提高产品质量计算，一年可回收资金 100 万元。

牵引动力系统采用交流调速技术，节电效果相当可观。我国现有城市无轨电车约 4500 辆，工矿电机车 50000 辆，若采用斩波调速，可节电 30%，每年可节电达 30 亿千瓦·小时。可见得交流调速技术用于电力机车意义更大。

数控机床和工业机器人，采用交流伺服控制系统是最理想的电力传动装置。目前，我国机床拥有量达 300 万台以上，已居世界第二，绝大部分未配数控装置，效率低、加工精度差，远不能适应现代化生产的需要，工业机器人更是需要高性能，宽调速范围的交流伺服系统。

此外，交流调速装置可广泛地用于石油、化工、纺织、造纸、卫星追踪系统以及大型天体望远镜的传动上。

第一章 异步电动机变频调速系统的理论基础

众所周知，异步电动机的调速性能远远不如直流电动机，然而寻求一种改善其调速性能的途径，使之与直流电动机相媲美是十分重要而有意义的研究课题。国内外电气传动工作者经过多年的辛勤劳动，总结出满足不同要求的交流变频调速系统的控制规律，掌握了异步电动机交流变频调速技术的理论知识，这对设计、实现变频调速系统具有指导性意义。本章将介绍三种常用的变频调速系统的理论知识。

第一种是电压/频率协调控制的开环变频调速系统（简称 $u/f=c$ 控制方式）；

第二种是高性能的矢量变换控制的闭环变频调速系统；

这两种调速方式属于恒转矩性质。

第三种是恒功率“弱磁”控制的交流异步主轴变频调速系统。

§ 1-1 异步电动机的 $u/f=c$ 控制原则

一、何谓 $u/f=c$ 的控制原则

$u/f=c$ 控制原则是开环变频调速系统常用的控制方式。其定义是，在变频调速中，异步电动机的定子端电压 u_1 和定子供电频率 f_1 始终保持协调控制，二者之比为常数，又称为恒压频比控制方式。也就是说，欲使异步电动机的转速降低，在降低定子绕组供电频率 f_1 的同时，必须降低定子端电压 u_1 ，二者比值为常数 c ，反之亦成立。需要注明的是这种控制方案属于恒磁通调速方法，异步电动机的转速只能低于额定转速向下平滑调节。

常数 c 如何确定呢？对鼠笼式异步电动机，常数 c 定义为定子绕组的额定相电压 u_{1n} 与额定频率 f_n 之比，又称为压频比，即

$$c = \frac{u_1}{f_1} = \frac{u_{1n}}{f_n} \quad (1-1)$$

当异步电动机的额定线电压为 380V 时，则 $c=220\text{V}/50\text{Hz}$ 。

当异步电动机的额定线电压为 220V 时，则 $c=127\text{V}/50\text{Hz}$ 。

$u/f=c$ 控制方式的 $u_1=y(f_1)$ 关系如图 1-1 所示。保持 $u/f=c$ 时，对额定线电压为 380V 的异步电动机来说，欲使转速降低 1/2，定子供电频率 $f_1=25\text{Hz}$ ，同时，异步电动机的定子绕组相电压应为 110V。也就是说，在额定频率向下调节时， u/f 保持线性的函数关系。当由额定频率向上调节时，受电动机的绝缘限制，应保持电动机的端电压不变，

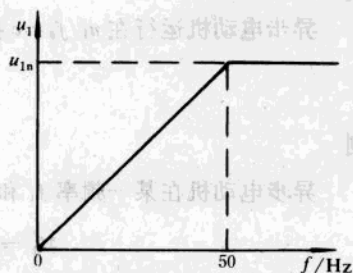


图 1-1 $u/f=c$ 的函数关系

即为额定值, $u_1 = y(f_1)$ 为水平线。

异步电动机在变频调速方式下运行时, 为什么一定要保持 $u/f=c$ 呢? 最终目的是希望异步电动机的气隙磁通和功率因数保持不变, 不致因压频比的失调而造成电动机的过激磁或欠激磁。这从定子电压平衡方程式, 容易得到证明。电动机等值电路如图 1-2 所示。当忽略定子绕组漏阻抗 z_1 , $z_1 = r_1 + jx_1$ 时, 电势方程式为

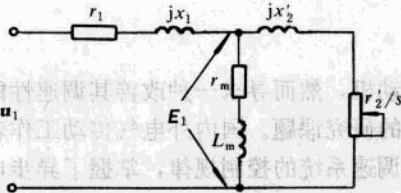


图 1-2 异步电动机的等值电路图

$$u_1 = E_1 = 4.44f_1W_1k_{w1}\Phi_m$$

式中, f_1 ——定子绕组供电频率; W_1 ——定子绕组匝数; k_{w1} ——定子绕组的绕组系数; Φ_m ——气隙磁通。则

$$\Phi_m = \frac{u_1}{4.44f_1W_1k_{w1}} = c' \frac{u_1}{f_1} \quad (1-2)$$

$$c' = 1/4.44W_1k_{w1}$$

欲使电动机转速低于额定转速向下调节时, 须使定子绕组供电频率 f_1 降低, 此时假若保持定子端电压不变, 由式 (1-2) 可看出, 势必会造成气隙磁通增大, 即 $\Phi > \Phi_m$, 电动机出现过激磁, 无功分量增大使电动机的 $\cos\varphi$ 降低。当降低频率 f_1 调速时, 若使定子端电压下降过多, 由式 (1-2) 看出, 会出现 $\Phi < \Phi_m$, 电动机欠激磁。由异步机的转矩公式 $M = c_m \Phi_m I_2 \cos\varphi_2$ 可知, 其转矩决定于气隙磁通 Φ_m , 于是电磁转矩就降低, 电动机的功率发挥不够。所以在减小 f_1 调速时, 定子端电压既不能保持恒定, 也不能降低太多。只有保持 $u_1/f_1=c$ 关系, 电动机按恒压频比运行, 才有可能使电动机气隙磁通保持恒定。压频比 c 的数值由式 (1-1) 决定。交流变频开环调速系统多采用这种控制原则。

二、 $u/f=c$ 时, 异步电动机的机械特性分析

改变异步电动机的定子供电频率 f_1 , 可以平滑调节其同步转速, 但是变频调速时, 异步电动机的机械特性将如何变化? 能否满足生产机械的要求? 存在的优缺点以及适用范围都应分析。

下面推导变频调速时异步电动机的机械特性。

设变频系数

$$c_f = f_1/f_n$$

式中, f_1 ——定子绕组的供电频率; f_n ——定子绕组供电的额定频率。

则

$$f_1 = c_f f_n$$

异步电动机运行在 $u_1/f_1=c$ 控制方式, 变频时, 由式 (1-1) 定子绕组供电端电压为

$$u_1 = c f_1 = \frac{u_{1n}}{f_n} f_1$$

则

$$u_1 = \frac{f_1}{f_n} u_{1n} = c_f u_{1n} \quad (1-3)$$

异步电动机在某一频率 f_1 和 u_1 工作时的转矩表达式为

$$M_1 = \frac{3p_1 u_1^2 r_2' / s}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad (1-4)$$

式中, u_1 ——定子绕组相电压; p_1 ——异步电动机的磁极对数; s ——异步电动机的转差率; r_1 、 r_2' 、 x_1 、 x_2' ——分别为定、转子的阻抗和漏抗。

用 $f_1 = c_f f_n$ 和 $u_1 = c_f u_{1n}$ 代入式 (1-4), 化简得任意频率下异步电动机的电磁转矩