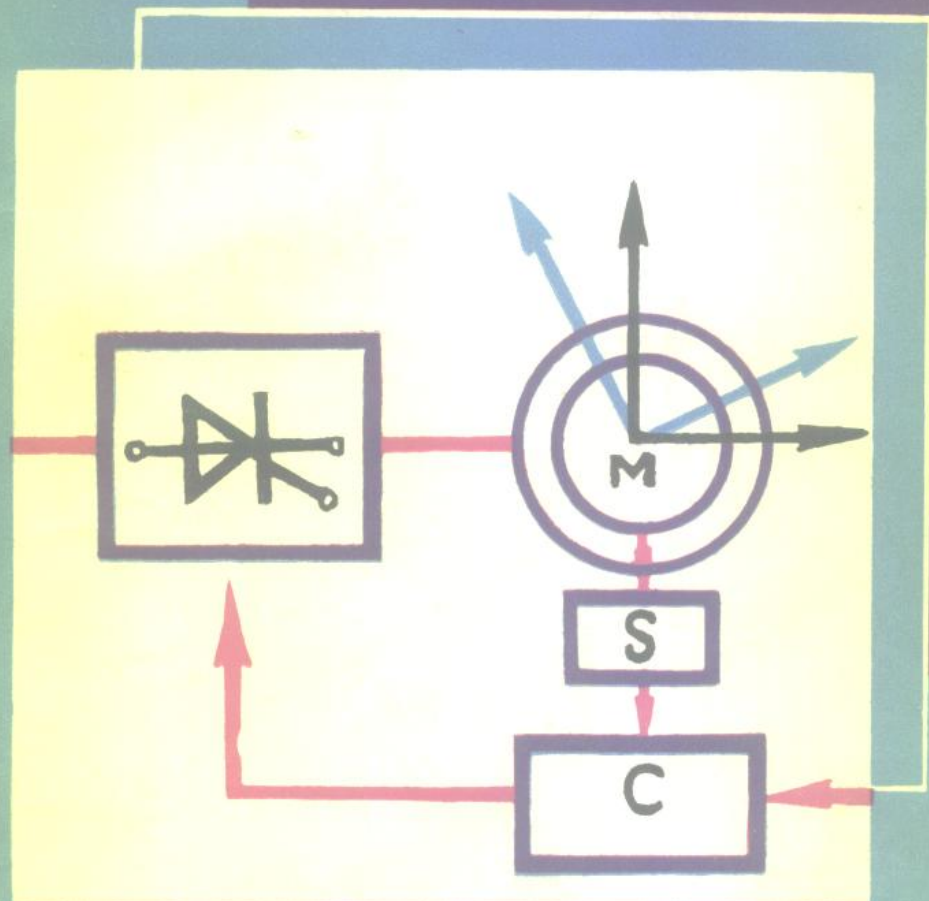


交流电机数学模型 及调速系统

陈 坚 编著



国防工业出版社

交流电机数学模型及 调速系统

陈 坚 编著

国防工业出版社

内容简介

本书侧重于各种交流调速系统特性的分析。第一章对八种类型的交流调速系统以及交流调速技术在发展与推广应用中的一些问题作了简要的介绍；第二、三章研究了异步电机和同步电机的数学模型；第四章对鼠笼型异步电机定子变频调速系统在各种运行方式下的特性作了较深入的分析；第五章讨论了异步电机的磁场定向控制；第六章研究了绕线型异步电机转子变频调速系统；第七章介绍了异步电机调压、调磁和调阻三种能耗调速系统；第八章讨论了同步电机自控频率调压调速系统的基本特性。

本书可供从事交流调速系统研究、设计和运行的科技人员及大专院校电机、工业自动化、电气自动化和电力电子技术专业的师生参考。

交流电机数学模型及调速系统

陈 坚 编著

国防工业出版社出版发行

(北京市车公庄西路老虎庙7号)

新华书店经售

北京卫顺排版厂排版 国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 1/32 印张16 425千字

1989年3月第一版 1989年3月第一次印刷 印数：0,001 — 2,480册

ISBN7-118-00385-9/TM·8 定价：9.75元

前 言

早在1885年,就已发明了交流鼠笼型异步电机。由于它具有消耗原材料少、制造成本低、结构简单坚固、运行方便可靠、环境适应性强以及容易向高压、高转速和大容量方向发展等优点,很快就获得了广泛的应用。但是,由于交流电机的转速调节难于实现,转矩的控制也比较困难,因而长期以来在工业、交通和国防装备等需要宽范围高要求的电气变速传动领域中,一直由直流调速系统占据着统治地位。1960年以来,主要由于大功率半导体器件的发展,使固态电力变换器供电的交流调速系统的生产成本逐年下降,而耗费材料和工时更多的直流电机的成本却逐年上升。所以,在这方面,交流调速系统对直流调速系统的竞争能力越来越强,至今在工业发达国家,两者的生产成本已相差无几(同等容量、同等技术指标的系统相比较)。由于交流调速系统的运行维护费用远低于直流系统,因而就经济性而言,交流调速系统已经超过了直流调速系统,大容量系统更是如此。另一方面,20年来随着变流技术、控制理论和控制手段的发展,多种交流调速技术已经趋于成熟,运行可靠性已经很高。欧美和日本的不少公司都有各种交流调速系统相继投放市场,技术性能越来越高而售价越来越低。在我国,最近几年引进了不少交流调速系统,运行性能可靠。在中国自动化学会电气自动化专业委员会和全国电力电子学会等单位的推动下,我国已经研制了鼠笼型电机的几种转差能耗调速系统、绕线型电机的转子变频同步调速系统、异步电机的几种定子变频调速系统以及同步电机自控频率调压调速系统,并正在研制高精度、快响应的由微处理机实现磁场定向控制的变频调速系统,包括双馈调速系统等。关于交流调速技术的一些理论问题,也受到了有关人员的高度重视,并已取得一些有价值的研究成果,为推广应用交流调速系统创造了很好的条件。

交流调速技术虽然经过了近20年的发展过程,但至今它仍是各国众多研究者的兴趣所在,也是许多大公司重点开发的技术领域。今后随着大功率半导体器件和集成芯片的发展,随着控制理论、电路理论和技术手段的进一步完善,交流调速系统将会逐步取代已有100多年历史的直流调速系统。

本书专门讨论交流电机的调速系统,侧重于系统特性的分析研究而不拘泥于具体电路。全书共分八章,第一章简要介绍八种交流调速系统的工作原理以及交流调速技术在发展和应用中的一些问题,接着在第二、三两章介绍异步电机和同步电机的数学模型,以此为基础在第四章中详细分析了鼠笼型异步电机的定子变频调速系统,第五章研究了异步电机的磁场定向控制,第六章分析了绕线型异步电机转子变频调速系统,第七章介绍了定子调压、调磁和转子电路斩波调电阻等三种异步电机转差能耗调速系统。最后,在第八章中讨论了同步电机自控频率调压调速系统。

本书是按作者在过去五年中为研究生讲授“交流电机数学模型和调速系统”的讲稿整理而成的。对于资料的选取、内容的取舍以及具体问题的探讨,曾得到了不少单位和专家的有益帮助,陈伯时教授、许大中教授、陶醒世教授以及何冠英高级工程师都对本书提过许多宝贵意见;熊蕊、胡星斗、杨丽莎等都曾为本书的整理、校对、誊写、插图等工作都付出了辛勤的劳动,作者在此一并致谢。

由于作者业务水平和教学经验有限,书中错误和不当之处在所难免,殷切期望同行专家和广大读者批评指正。

编著者

目 录

第一章 交流电机变速传动系统概论	1
§1 交流传动与直流传动的基本特点	1
§2 固态电力变换器——斩波调压器和变频器	6
§3 交流变速传动系统的基本类型	17
§4 交流变速传动技术在发展和推广应用中的—些问题	31
§5 交流变速传动的应用领域	36
第二章 异步电机数学模型	40
§1 A, B, C 系统磁链、电压和转矩方程式	40
§2 坐标变换和变换矩阵	51
§3 一般化的 $d, q, 0$ 系统中异步电机的数学模型	67
§4 同步旋转 M, T 坐标系中异步电机的数学模型	78
§5 静止坐标系—— $\alpha, \beta, 0$ 系统中异步电机的数学模型	83
§6 瞬时值复数分量—— $1, 2, 0$ 系统中的异步电机的数学模型	86
§7 K 坐标系中异步电机空间矢量方程式	96
§8 异步电机的状态方程	109
§9 异步电机的小信号(扰动)模型及传递函数	114
第三章 同步电机数学模型	128
§1 A, B, C 系统磁链和电压方程式	128
§2 $d, q, 0$ 系统的电压和磁链方程式	138
§3 同步电机转矩方程式	141
§4 用标么值表示的 $d, q, 0$ 系统的基本方程式	143
§5 同步电机的等值电路和运算电抗	155
§6 忽略脉变电势时的暂态特性	165
§7 同步电机的状态方程	173
第四章 鼠笼型异步电机定子变频调速系统	179
§1 逆变器输出电压(电流)波形分析	180
§2 逆变器供电的异步电机稳态特性计算	198
§3 恒压频比、恒磁链、恒最大转矩运行	200

§ 4 最小损耗运行·····	224
§ 5 恒压、恒流和恒转差运行·····	234
§ 6 电压型逆变器-异步电机转速开环系统·····	236
§ 7 电流型逆变器-异步电机转速开环系统·····	251
§ 8 电流型逆变器-异步电机转差频率控制系统·····	263
第五章 异步电机磁场定向控制·····	277
§ 1 基本控制原理·····	278
§ 2 变换矩阵和变换电路·····	299
§ 3 M 、 T 系统和 α 、 β 系统中的一些基本关系式·····	304
§ 4 转子磁链 Ψ_2 的观测模型·····	315
§ 5 控制系统举例·····	321
§ 6 磁场定向控制时系统的传函和框图·····	331
第六章 绕线型异步电机转子变频调速系统(串级调速系统)·····	340
§ 1 基本工作原理和运行方式·····	340
§ 2 转子电路的换流过程和基本方程式·····	349
§ 3 电磁转矩和机械特性·····	378
§ 4 次同步串级调速系统的优、缺点及改进措施·····	409
§ 5 次同步串级调速系统的闭环反馈控制·····	414
§ 6 超同步串级调速系统·····	422
第七章 异步电机转差能耗调速系统·····	428
§ 1 三相交流斩波调压电路·····	429
§ 2 鼠笼型异步电机定子恒频调压调速系统·····	434
§ 3 变极调压调速·····	440
§ 4 带转差离合器的调磁调速系统·····	447
§ 5 绕线型异步电机转子斩波调阻调速系统·····	453
第八章 同步电机自控频率调压调速系统·····	461
§ 1 基本工作原理和类型·····	462
§ 2 静态运行特性·····	480
§ 3 调速系统的运行方式及控制框图·····	491
§ 4 动态特性研究·····	494
参考文献·····	504

第一章 交流电机变速传动系统概论

§1 交流传动与直流传动的基本特点

在工业、农业、交通运输、国防军事装备、科研设备以及日常生活中，都广泛应用着各式各样的依靠电力传动的机械系统——电气传动系统。如果带动机械运转的原动机是直流电动机，则称为直流电气传动系统；如果带动机械运转的原动机是交流电动机，则称为交流电气传动系统。根据转速是否变化，电气传动系统又可分为恒速电气传动系统和变速电气传动系统两大类。实际上，大多数机械都有变速的要求，或者是为了满足生产工艺的要求，改进传动性能，提高产品质量；或者是为了提高劳动生产率，提高效率，降低成本；或者是为了在满足一定要求和一定需要的情况下，力求减少损耗，节约电能。因此，研究电气传动系统的调速问题在技术和经济上都具有重大意义。

直流电机的研究较交流电机的研究进行得更早，并迅速得到应用。早在1838年就进行了由蓄电池供电，用于带动螺旋桨推进船舶航行的直流电动机试验，随后由电池供电发展到直流发电机供电。到上世纪80年代左右，直流电动机就已具备了现今直流电动机的全部主要特征。

例如，广泛使用的他激直流电动机转速 N 以及它所产生的电磁转矩 T_e 分别为：

$$N = \frac{U_a - I_a r_a}{K_a \phi} \quad (1-1)$$

$$T_e = K_r \phi I_a \quad (1-2)$$

式中 U_a ——加到电枢上的直流电压；

I_a ——电枢电流；

r_a ——电枢等效内阻；

$\phi = Ki_f$ ——励磁电流 i_f 所产生的磁通；

K_e, K_r, K ——与电机结构参数有关的系数。

很明显，依靠减小电枢电压 U_a 和减小励磁电流 i_f 的方法可以十分简便地调低和调高转速 N ；改变电枢电流 I_a ，就能简便而线性地无时间滞后地控制转矩 T_e 。

长期以来，由于直流电机转速的调节性能和转矩的控制性能比较理想，直传动系统一直在变速传动领域中占统治地位。为了获得可变的直流电压以调节转速和控制转矩，60年代以前大都是采用“直流发电机-直流电动机”机组，即伦纳德(*Leonard*)控制方式。1960年以后由于大功率半导体器件的出现，这种伦纳德系统中的直流发电机已为静式(固态)整流器所代替，也就是把公用的三相交流电源经可控整流电路而获得可变的直流电源，对直流电动机供电。这种由“可控整流器-直流电动机-被传动的机械”所组成的系统仍被称为*Leonard*系统，或静式(固态)*Leonard*系统。在额定速度以下用减小电枢电压的方法来调速，系统具有恒定的最大转矩运行特性，输出的最大功率随转速的降低而减小。在额定速度以上用减小励磁的方法调速，系统具有恒定的最大功率运行特性，电动机能产生的最大转矩随转速的升高而减小。采用转速负反馈、电流负反馈和前馈的控制手段可以使传动系统获得高精度、快响应、宽范围的转速调节和转矩控制特性。这种静式(固态)*Leonard*直传动系统在现今变速电气传动领域中是一种主要的传动形式，广泛应用于各行各业。但是，直流电气传动系统由于直流电机本身结构上具有机械换向器和电刷，而使这种电气传动不尽理想。直传动系统具有以下主要的缺点：

1. 直流电动机的机械换向器由很多铜片组成，铜片之间用云母绝缘薄片隔开，这种结构制造工艺复杂，费工时，原材料消耗大，增加了直流电动机的成本，并降低了功率/重量比值，和同等容量的鼠笼型交流电动机相比，直流电机要贵好几倍，单位重量的功率要小一倍。

2. 换向器之间的云母绝缘限制了换向片之间的电压不能太

高, 由于机械换向困难, 电枢电流的大小及其变化率受到限制, 因此直流电机的容量和转速都受到限制, 很难发展高速大容量的直流传动系统。

3. 电刷火花使直流电机的装置环境受到限制, 易燃、易爆, 多尘以及环境恶劣的地方不便使用直流电机。

4. 机械换向器和电刷之间的磨损因换向火花而更加严重, 工作可靠性不够高, 平均无故障时间短, 维修保养工作量大。

在上世纪80年代以前, 直流传动是唯一的电气传动方式。1885年交流鼠笼型异步电机问世, 由于它结构简单、坚固, 惯量小, 运行可靠, 很少维修, 原材料消耗少, 制造成本低, 可用于恶劣工作环境, 所以, 很快就得到广泛应用。至今在运行电动机的总量中交流电机占了绝大多数。但是在这些电机中绝大部分都是恒速运行的。变速传动领域中直流传动仍占多数。

交流电动机的转速 N 和转矩 T_e 分别为:

$$N = \frac{60f_1}{n_p}(1-S) = \frac{60\omega_1}{2\pi n_p}(1-S) \quad (1-3)$$

$$T_e = \frac{2}{3}n_p \cdot \psi_{23} \cdot I_{23} \sin\theta_{23} = -\frac{2}{3}n_p \psi_{23} I_{r23}$$

$$= \frac{2}{3}n_p \frac{L_m}{L_r} \psi_{23} I_{r13} \quad (1-4)$$

稳态时 T_e 可简化为:

$$T_e \approx 3n_p \frac{U_1^2}{\omega_1} \frac{\frac{r_2}{S}}{\left(r_1 + \frac{r_2}{CS}\right)^2 + (\omega_1 L_{11} + C\omega_1 L_{21})^2} \quad (1-5)$$

式中 $C = L_s/L_m$;

L_s ——定子自感;

L_m ——定子、转子之间的互感;

n_p ——磁极对数;

ω_1 ——定子供电电源角频率;

U_1 ——定子相电压有效值。

S ——转差率；

r_1, L_{11} ——定子电阻和漏抗；

r_2, L_{21} ——折算到定子的转子电阻和漏感；

L_r ——折算到定子的转子自感；

ψ_{23}, I_{23} ——转子三相合成的磁链和电流矢量幅值；

θ_{22} —— ψ_{23} 与 I_{23} 的相位差；

$I_{\tau 23}$ —— I_{23} 在 ψ_{23} 垂直方向上的分量；

$I_{\tau 13}$ ——定子三相合成矢量电流 I_{13} 在 ψ_{23} 垂直方向上的分量。

很容易看出，改变异步电动机的极对数(n_p)、转差率(S)和供电电源角频率(ω_1)，都能调节异步电动机的转速。控制电机的外加电压、输入电流和内部磁链，可以控制电磁转矩的大小。

但是，第一，靠改变极对数来调速，由于受到电机结构和制造工艺的限制，通常只能实现两三种极对数的变换，不能做到连续地调节速度，调速范围和极数都非常有限。

第二，依靠改变定子电压（改变电源电压或定子串阻抗），或绕线型电动机转子串电阻，或带转差离合器的异步电机调节励磁电流都可实现变转差率调速。但是，电机的损耗与转差率 S 成比例地增大，效率随转速的降低而降低，由于电机在高转差低转速下运行特性恶化，效率降低以及严重发热，使实际可行的调速范围受到限制。

第三，连续地改变电源频率，虽然可以十分理想地实现交流电动机的无级调速，但这要有一套变频电源，在60年代大功率半导体变频装置问世之前，要获得一套变频电源，困难不小，代价很大。这是交流电动机的变频调速系统不能获得推广应用的一个原因。

早在本世纪30年代，国外就开始研究各种交流电机变速传动的原始线路。1930年在德国曾试用闸流管组成交-交变频器，构成16 $\frac{2}{3}$ Hz电机车电源。40年代，也曾经研究过用闸流管组成交-直

-交变频器控制交流电机转速，研制过无换向器电机的试验装置。而且在工业上还曾试用过以可控水银整流器作逆变元件的串级调速装置。50年代，国内外都曾对采用闸流管作逆变元件的变频器向异步电机供电的变速传动装置进行工业试验，但是所有这些试验性的研究和工业实验最终都因装置效率低，体积大，价格高，可靠性差等原因而未能推广应用。至于采用直流电动机驱动变频交流发电机构成变频机组电源，控制交流电动机的速度，这种方法后来也因机组体积庞大，效率低，投资大，机组维修工作量大等一系列缺点，实际应用不多，现在几乎完全被淘汰了。1957年晶体闸流管问世以后，解决了大功率电能变换的器件问题。大功率半导体变流元件的出现和发展，促进了各种变流电路的发展和完善，变流电路的发展、改进和新的要求又推动了各种变流器件的发展和改进。这样，20多年来随着电力电子技术的飞速发展和生产工艺的改进以及功率半导体器件价格的降低，交流变速传动所需要的变流设备不仅在技术性能指标上已完全满足要求，而且在经济上变流电源装置的价格也以每年平均10%的速率逐年下降。

在5~10年前，交流变速电气传动系统难以推广应用的主要原因之一是其经济上的投资较直流Leonard变速传动系统要大些。但是，目前在工业发达国家，由于电子元器件较便宜，变流器和变频器的成本和售价逐年下降，相反，直流电机的原材料，特别是劳动工时的成本价格较高，这样交流变速传动系统的推广应用受价格因素限制的情况已经发生了很大的变化。目前，在国外工业发达国家，交流变速传动的经济指标已赶上直流传动系统。我国目前变流元件价格仍然较高，故交流变速传动系统在某些领域中的推广应用暂时还受到初投资费用较高的限制，但是交流变速传动系统运行中的维修费用远低于直流传动系统。另一方面从整个电气传动系统的价格组成来看，以1982年的统计资料分析，在直流传动系统中直流电机的价格占60%，变流装置等控制设备的价格占40%，而在同一容量的交流变频传动系统中，交流电机的价格不到30%，变流装置等控制设备的价格超过70%。由于电机制造

是个老行业了,工艺已趋完善,难得再有改进,而原材料、劳动力和能源费用等方面的成本价格逐年以5%的速率上升。与此相反,电子器件制造工艺仍处在飞跃发展阶段,变流装置及控制元件的价格(包括集成电路芯片和微型计算机芯片等)逐年以10%甚至更大的速率下降。因此,不难看出,从经济上看,总的发展趋势对交流变速传动系统的推广应用是极为有利的。由此完全可以断言,不久的将来,在我国各种容量范围内交流变速传动的经济指标也会赶上和超过直流传动系统。交流变速传动系统将会逐步地取代绝大部分变速传动领域中的直流Leonard系统。

§2 固态电力变换器——斩波调压器和变频器

在交流电气传动系统中,电力变换器 C 是主电源与交流电动机 M 之间的中间环节。一般说来,主电源有两种:一种是直流电源 DCV ,如电池电源;另一种是恒频恒压 $CVCF$ 三相交流公用电网。交流电动机可能是普通同步电动机,带转子位置检测器的自控频率同步电机(无换向器式电机),永磁式同步电动机或同步磁阻电动机,也可能是绕线型异步电动机或鼠笼型异步电动机。在图1-1所示的一般化的交流电气传动系统中,电力变换器 C_1 和 C_2 的作用是将一种电压和频率的电,例如 U_s 和 f_s 变换为另一种电压和频率的电(例如 U_1 、 f_1)供电给电动机的定子 s 或

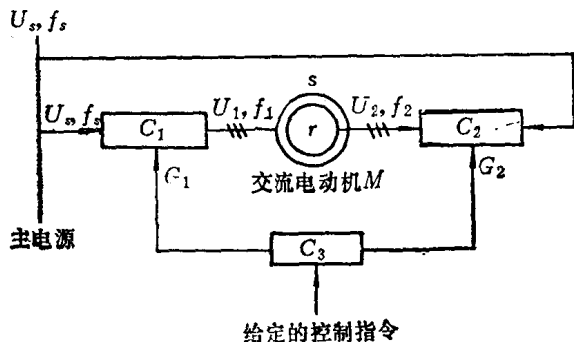


图1-1 交流变速传动系统

s —定子; r —转子;
 C_1 、 C_2 —电力变换器; C_3 —控制电路。

转子 r 。对电力变换器 C_1 或 C_2 进行控制,调节其输出的电压或频率就能控制电机的转矩,调节电机的转速。

一、电力变换器的开关器件

电力变换器是以大功率半导体器件为开关元件的调(变)压器、变流器和变频器。由于这种开关元件是静止的固态器件,故又称为静止(或固态)变流器、变频器,等等。从1948年第一个晶体三极管出现和1957年第一批普通晶闸管问世,至今各种类型的功率半导体开关器件已广泛应用于各类电力变换电路中,用作交流和直流调压、变流和变频。在各类电力变换器电路中,目前主要应用的固态开关器件有:

1. 普通晶闸管(或叫SCR), 逆导晶闸管和双向导通晶闸管。

这些都是没有自关断能力的器件,因而又叫半控元件。在其控制极上外加一触发脉冲,使其从阻断状态转为导通状态后,正向压降仅1V左右,故它是一种较理想的开关元件。但是一旦导通后,即使撤去控制极的外加触发电压,只要阳极电压不为零,阳极电流大于维持电流,元件仍保持为导通状态。如果主电源是交流电源,交流电源电压每半周过零后的自然反向可用以使晶闸管电流减小到零。依序触发主电路中的各个晶闸管,可以依靠交流电源电压反向,实现电流从一个元件转换到另一个元件的自然换流;在由直流电源供电时,电流不能自然地降为零,因此必须附加强迫换流回路,实现强迫换流,通常是应用辅助充电电容器,产生一个反向电压或反向电流强加在已处于导通状态的晶闸管上,强迫其中的电流降为零而被关断。

这种无自关断能力的晶闸管是最早发展起来的一种半导体开关器件,工艺较成熟,电压电流定额值都做得比较高,是目前大容量变换器中广泛采用的开关器件。其派生器件很多,例如快速晶闸管、光控晶闸管等,且都已在不同的领域得到应用。

2. 可关断晶闸管(GTO)

可关断晶闸管GTO与普通无自关断能力的晶闸管不同,当

其控制极加正向触发导通信号时, 元件导通。若在处于导通状态的 *GTO* 的控制极上加上足够大的反向关断信号时, 元件立即从导通状态转为关断, 一旦元件关断后, 就能维持在截止状态, 直到下一个正向触发导通信号加到控制极时才转为导通状态。这种有自关断能力的开关元件, 叫全控式元件。

可关断晶闸管是一种快速开关元件, 可以达到比一般晶闸管更快的开关速度, 工作频率可达100kHz。但是由于 *GTO* 和普通晶闸管一样都存在着开关损耗问题, 所以在高频使用时, 负载能力相应要下降。

由于 *GTO* 元件具有良好的关断特性和快速性, 因此利用它作为逆变器或直流斩波器时, 将因省去复杂的换流电路而使电力变换器主电路大为简化, 故障率相应减少, 运行可靠性得到提高。

3. 功率晶体管 (*GTR*)

大功率晶体三极管 *GTR* 是一种具有自关断能力的开关器件 (全控元件), 其正向导通的程度完全取决于其基极控制信号的电流大小, 撤消基极电流, *GTR* 即自行关断, 在逆变和变频电路中采用 *GTR* 作开关元件, 与晶闸管相比它有以下优点:

(1) 不需要换流电路, 这使逆变或变频电路得到简化, 装置体积缩小, 可靠性提高, 成本下降。

(2) 开关速度快, 特别适用于频率较高的场合。用以实现 *PWM* (脉冲宽度调制) 控制, 既可改变逆变器输出频率和电压的大小, 又可改善逆变器或变频器的输出波形, 从而改善传动特性。

(3) 开关损耗小, 效率高。

功率晶体管用于逆变和变频的主要问题是难于大容量化和不能用于高压电路。另外由于晶体管的放大倍数小, 而且它不象普通晶闸管那样具有正反馈的特性, 故基极激励功率较大, 其驱动电路比较复杂。但是近年来功率晶体管的定额大有提高, 且价格不断降低, 有利于在中小功率的交流传动中推广应用。

4. 功率(电力)金属氧化物场效应晶体管,即*P-MOSFET* (*Power MOS field effect Transistor*)

*P-MOSFET*不同于普通功率晶体管,普通*GTR*是靠改变基极电流使基区注入发射区的载流子数目发生变化来控制集电极电流*i_c*,所以*GTR*是一种电流型的器件,其电流放大倍数并不大。*P-MOSFET*则是在栅极上加一个控制电压,利用形成电场的强弱来改变导电沟道的宽窄,实现对漏极电流的控制。也就是说,它是在基本上不取用信号电流的情况下,由栅极电位的高低来控制漏极电流。所以*P-MOSFET*属于电压型控制器件,因而其控制电路简单,输入阻抗大,功率放大系数大,驱动功率小,可直接应用有关集成电路的驱动器件。更重要的是*P-MOSFET*开关速度极快(仅 $0.01\sim 0.03\mu\text{s}$),存储时间几乎为零,其最高工作频率可达几万kHz。此外,还由于漏极电流温度系数是负的,不容易引起热点和二次击穿,所以在实际应用中它比*GTR*安全区大,可靠性高得多。

*P-MOSFET*作为一种理想的开关器件,近年来受到广泛重视,并已在高频小功率*PWM*交流变频系统中得到应用。

和*P-MOSFET*相近的还有一种*P-SIT* (*Power Static Induction Transistor*)——静电感应型功率晶体管正在研究之中,其电压等级可以做得高一些。可望发展成为一种实用的理想开关器件。

5. 绝缘门极整流器 *IGR* (*INSULATED GATE RECTIFIER*)

这是通用电气公司报道的新型固态开关器件,它不仅具有高的门极阻抗,可用逻辑电平级信号直接驱动导通和关断,而且具有双向阻断电压能力,其电流密度也比一般场效应管大10倍,比晶体管大2倍,是一种很有前途的开关器件。

将*SCR*、*GTR*和*P-MOSFET*适当的集成、组合,可构成具有不同开关特性的新型器件,这类研制工作正在大力进行中。

二、电力变换器的基本类型

根据电力变换器输入、输出的电压和频率的不同，从其变换功能上看，电力变换器可以分为以下五类：

1. AC-DC整流器

实现交流-直流之间的变换，交流输入电压频率 $f_s \neq 0$ ，直流输出电压频率 $f_1 = 0$ 。如果是不可控整流元件所构成的不控整流器，则输出电压 U_1 只与输入电压 U_s 成正比。如果是可控整流元件所构成的可控整流器，则输出电压 U_1 还是控制角 α 的函数。

最常用的三相桥式全控整流器输出空载直流电压 U_1 为：

$$U_1 = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_s \cos \alpha \quad (1-6)$$

式中 U_s ——交流输入相电压有效值。

调节触发控制角 α ，即可改变整流器的直流输出电压 U_1 的大小。

三相桥式半控整流器输出空载直流电压 U_1 为：

$$U_1 = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_s (1 + \cos \alpha)$$

2. DC-AC逆变器

实现直流-交流之间的变换，其输入直流电压的频率 $f_s = 0$ ，输出交流电压频率 $f_1 \neq 0$ 。如果交流输出侧接在交流电源上，则这种逆变器被称为有源逆变器或他励式逆变器，其作用是把直流电功率经逆变后送至交流电源。有源逆变器电路与全控的整流电路是完全一样的。在全控整流电路中，当控制角 α 在 $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 范围内变化时，直流输出电压 $U_1 > 0$ ，交流电源将交流电功率经整流后变为直流电功率输出送至负载。此即工作在整流状态。当控制角在 $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 范围内变化时（这里指不考虑换流重叠的理想情况），直流电压 $U_1 < 0$ ，这时交流电源将接收来自直流侧经逆变后所得到的交流电功率。此即工作在有源逆变状态。这时的原可控整流器即成为有源逆变器了。

如果逆变器的交流输出不是接在交流电源上，而是接在电阻