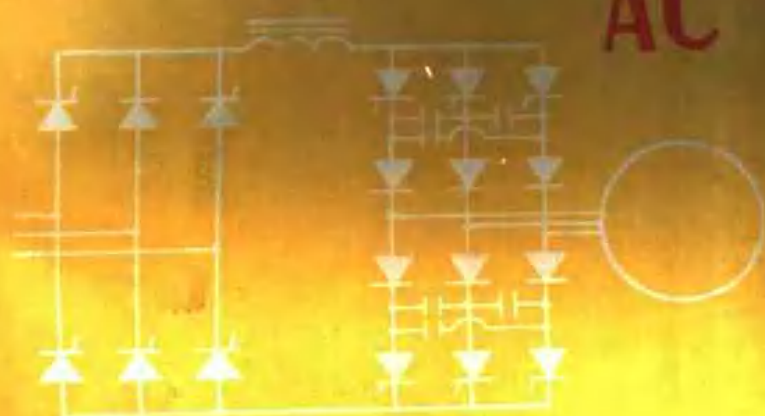


重慶能源

交流调速传动系统专辑

ADJUSTABLE
SPEED

AC DRIVE
SYSTEMS



重慶市電機工程學會
重慶市能源研究會
重慶市節能技術服務中心

交流调速传动系统

原著 Bimal K. Dose (美)

翻译 《交流调速传动系统》翻译组

重庆市电机工程学会
重庆市能源研究会
重庆市节能技术服务中心

一九八六·十二

内 容 简 介

交流电机的固态速度控制在各种工业应用上正在日益推广。就现在技术的发展方向来说,在不久的将来广泛地应用交流调速传动似乎是必然的。

本书开始,编者亲自写了一章,评论交流传动技术的情况并对将来作了预测。本书五十篇论文是从大量有关的文献中精选出来的。并按课题分成下面的部分和章节。

感应电动机传动

相控变流器传动

电压型逆变器传动

电流型逆变器传动

滑差功率控制传动

同步电动机传动

电流型逆变器传动

交—交变频器控制的传动

书尾从广泛的文献目录中精选了一些论文题目,并按课题分类。

重 庆 能 源

《交流调速传动系统》专辑

原 著 Blmal K. Bose (美)

翻 译 《交流调速传动系统》翻译组

出 版 重庆市电机工程学会

重庆市能源研究会

重庆市节能技术服务中心

印 刷 重庆嘉陵造纸厂印刷所

重庆市报刊登记证内字第081号

目 录

前言

编者序

第一章：交流传动绪言	(9)
第一编：感应电动机传动	(32)
第二章：相控变流器传动	(32)
用控制定子电压的方法控制感应电动机的转速	(32)
相控交流电动机传动用的几种对称三相电路的比较分析	(40)
用对称触发晶闸管控制电压的感应电动机的分析	(50)
用功率晶体管控制三相交流功率	(68)
带锁相环调节的三相感应电动机的双向晶闸管速度控制	(75)
交流电动机固态起动器的设计 and 应用	(83)
第三章：电压型逆变器传动	(88)
适用于交流感应电动机传动的宽调节范围静态逆变器	(88)
整流器—逆变器感应电动机传动系统的分析和简化表达式	(95)
整流器—逆变器感应电动机传动系统稳定性分析	(107)
改进型的脉宽调制逆变器电动机传动装置	(125)
晶闸管逆变器中消除谐波和电压控制的通用技术：	
第 I 部分——消除谐波	(136)
晶闸管逆变器中消除谐波和电压控制的通用技术：	
第 II 部分——电压控制	(148)
脉宽调制式逆变器感应电动机传动中的谐波作用	(158)
用逆变器供电时感应电动机的转矩脉动	(168)
控制转差率的静态逆变器传动装置	(175)
电流控制的PWM晶体管逆变器传动装置	(181)
采用变频变压电源供电的感应电动机磁通控制方法	(192)
磁场定向原理在旋转磁场电机矢量变换新型闭环	
控制系统中的应用	(201)
使用微处理机实现标准交流电动机的磁场定向控制	(206)
运输车辆采用逆变器感应电动机传动	(216)
交流调速传动在应用中的若干准则	(228)
第四章：电流型逆变器传动	(238)
交流电动机传动系统用的电流源变频器	(238)
在单相交流供电的车辆中，用于三相感应电动机的功率变频器	(244)

向感应电动机馈电的可调输入电流逆变器的两种换流	
电路的比较分析	(255)
可控电流源感应电动机变频传动、状态变量的稳态分析	(273)
采用DQ模型研究感应电动机拖动的控制 环路	(289)
可控电流源感应电动机变频传动系统的设计和建立模型	(300)
电流型感应电动机传动中转矩脉动的分析和控制	(314)
静止式交流感应电动机传动系统的同步控制	(323)
高性能可控电流源逆变器传动系统	(333)
新型多重化电流源逆变器	(345)
第五章: 控制转差功率的传动	(351)
在转子上采用静止逆变器的感应电动机转速控制	(351)
用晶闸管逆变器回馈感应电动机的转差功率	(362)
用于水泵传动的大容量感应电动机的无换向器克雷蒙控制系统	(370)
用于感应电动机传动系统的转子斩波器控制:	
时间比控制法	(378)
交流调速传动在泵和压缩机上的应用	(386)
对于大型转子绕组式感应电动机调速系统定子有功功率	
和无功功率的高响应控制	(392)
第二部份: 同步电动机传动	(401)
第六章: 电流型逆变器传动	(401)
采用电流源逆变器的同步电动机传动	(401)
无换向器直流电动机的简化模型和闭环控制	(408)
由电流源逆变器供电的自控同步电动机的动态特性	(418)
由电流源逆变器供电的同步磁阻电机的稳定特性	(432)
由电流源供电的线性感应式电机的控制和模拟	(447)
轧钢机的无换向器直流传动	(460)
负载换流同步电动机传动的新型强迫换流起动方案的分析	(471)
大型同步电动机的静态变频起动和传动系统	(483)
换流式逆变器—同步电动机传动装置的使用和定额	(495)
第七章: 循环变流器(交交变频)控制的传动	(509)
无换向器无刷的交流电动机	(509)
采用同步电动机的牵引机车动力装置	(522)
圣劳伦斯水泥公司8750马力无齿轮球磨机传动的电气情况	(535)
无齿轮回转窑传动系统和电子控制装置	(542)

前 言

在我国百花盛开的节能科技园地里，重庆市电机工程学会和重庆市能源研究会翻译、重庆市节能技术服务中心编印发行的美国电气及电子工程师学会(IEEE)出版的“交流调速传动系统”一书，今天与广大读者见面了。

“交流调速传动系统”是由国际知名交流技术专家B.K.布什主编的。全书按交流调速传动系统的理论、控制、设计和应用的顺序共精选编排论文五十篇。它全面的介绍和评论了国际上推广应用和研究的交流调速新技术，详细阐述了各种交流调速方式的应用范围、优缺点及发展前景预测，它是目前我国翻译的具有最新国际交流调速技术水平的新书。

翻译出版“交流调速传动系统”一书的目的，是为了更好地学习借鉴国外的先进技术、提高我国交流调速的技术水平，推动节能工作向深度发展，为各行各业提高经济效益服务。大家知道，在电力的应用中约有60%的电能用于传动，而由于多方面原因传动效率很低，电力浪费严重。据初步测算只要在轧钢机、卷扬机、各种泵和风机等设备上推广应用交流调速传动装置即可提高效率20~30%，由于转速与负荷匹配设备效率提高即可节约大量的能源并可减少维修，降低成本，以取得显著的经济效果。

能源是国民经济和社会发展的重要物质基础，也是当今世界人们最关注的一个大问题，在我国特别是电能长期供不应求，极大的制约国民经济和人民生活发展的问题更加引起各级领导和广大职工群众的关注。要解决好能源问题从根本上必须认真贯彻落实国务院关于“开发和节约并重”的方针，只有一手抓开发电力，扩大电力生产，一手抓节约电力，提高电能有效利用率，才能解决电力问题，我们认为“交流调速传动系统”一书对节约用电是有重要意义的。鉴于本书既具有科研参考价值又有应用性特点，希望本书能成为广大科研、设计和工矿企业的技术和管理人员在调速传动节能方面的学习良册，工作之友，在建设四化的征途上让它开花结果。

中国能源研究会 常务理事 张 钦 河
重庆市能源研究会付理事长

1 9 8 7 . 2 . 1 0

编 者 序

交流电机的固态转速控制技术在最近十五年中有很大进展。虽然大家知道,在出现固态电路技术之前有一些复杂的、效率低的、费用高的交流电机转速控制方法,但是按照惯例,总认为交流电机适用于恒速的传动。长时期以来,工业中调速的传动系统都采用直流电动机。所以,当二十世纪五十年代末推广晶闸管时,晶闸管就很快在直流传动的交换器中得到应用。在六十年代初,有几个著名作者提出了换流技术很精巧的固态逆变器。这样就实现了交流电动机转速控制所需要的实际有效的静止式变电压变频率电源。

交流电机,特别是笼型感应电动机,和直流电机相比似乎具有显著优点。如价格较低、重量较轻、惯性小,效率较高、强度和可靠性有改进,维护要求低,而且由于没有换向器和电刷,能够在有灰尘和爆炸性的环境中工作。其中的若干优点是头等重要的,这就使得在一些领域中必须采用交流传动,此外,当需要精确的速度控制或在多机传动中需要紧密的速度跟踪时,似乎明显的要选用同步电机。尽管交流电机有许多优点,其变换器的费用和控制要求的复杂性,是目前在和直流传动竞争中阻碍交流传动普遍应用的主要因素。近几年的研究和研制都主要集中在这些方面。晶闸管的价格实际上已经稳定,而其额定电压和额定电流等性能,正在连续改进。功率晶体管容量最近有显著提高,并且在低功率到中等功率的传动中得到应用。另外还有功率MOS元件也出现了。用于变流器的晶闸管也开始得到注意。分立半导体由集成功率组件代替,有助于显著减少半

导体组装费用,而且把集成变流器系统装在电机框架上的最大现实性可能为时不远了。由于大规模集成电路(LSI)技术的出现,电子控制装置的费用大大减小了。用微型机实现控制系统不仅能简化硬件和改进可靠性,并使不可能用硬件控制的传动系统达到性能最佳化,目前设计的交流电机逐渐有所改进,提高了效率又不附加费用。近来广泛使用永磁同步电动机,因为这种电机不需磁场电源和没有附加铜损。在文献中对复杂的交流传动系统的模拟和计算机仿真已广泛注意,而且交流电机的控制性能目前几乎可与直流电机的性能媲美。

考虑现在的技术发展趋势,在最近的将来,似乎不可避免的要普遍应用交流传动,目前工业界强烈要求了解交流传动技术的基础。但是关于交流传动的文献已大大地增多,而且向不同方面激增,因此一些读者试图研究这些文献就会遇到困难,在这个领域中还没有出版合适的读本。

本书是提供给研究交流传动并应用这些知识来研制和设计传动系统的工业工程师使用。本书内容也可以考虑作为大学研究生一学期的课程。当然,这是假定读者具有变流器、电机、控制理论等基础知识。本书主要从大量交流传动文献中仔细选取翻印了五十篇论文,并且还包括由编者写的第一篇论文。选择的标准是论文应能反映技术的主流。叙述应清晰扼要,具有思想和表达的统一性。把写得好的评论文章看作是主要的组成部份。然而,即使采用上述标准,选择过程也很不容易。因为在文献中有很多好的论

文。虽然查阅了国际上的英文刊物，主要考虑的是IEEE刊物中的论文，并且只考虑选用专业读者特别感兴趣的论文。

本书主要内容分成两编，一编论述感应电动机传动系统，另一编论及同步电动机传动系统。试图按理论、控制、设计和应用的顺序编排这些论文。所选的文献目录附于书后。对于这个领域比较生疏的读者，要理解这些论文可能显得有些困难。为此，编者自己写了第一章，全面评论交流传动技术，用非数学方法来简单叙述各种交流传动。希望能提供一些基本情况，使读者能够顺利阅读其它各节。第二章叙述定子采用相控交流电源的感应电动机传动。这种传动系统用于低功率到中等功率的传动，其变流器结构比较简单。第三章叙述感应电动机的变压变频率逆变器传动，这是目前交流传动最普通的型式。这个范围的文献很多，所以第三章中包含的论文最多。第四章论述变频的电流控制的感应电动机传动系统，这种传动由于有一些有吸引力的特性，目前受到广泛的注意。第五章论述具有转差功率调节的感应电动机传动系统，所用的绕线型电动机在转子中带

有变流器。这种传动对大功率和调速范围有限的应用比较有利。第六章论述使用电流控制逆变器的同步电动机传动系统。这种传动通常需要轴位置敏感信号以便产生逆变器触发脉冲，这种传动一般称为无换向器直流电动机(CLM)或称为用电子换向的直流电动机(ECM)。第七章论述交交变频制的同步电动机传动。本书没有包括关于交交变频器馈电的感应电动机传动或电压馈电的同步电动机传动，这决不是因为这些传动不重要。单相交流传动在低功率应用中很普遍，也没有包括在本书之内。本书只考虑了与交流传动有关的论文。当然，在一些场合下也有例外。

在前言结束之前，我必须感谢几位专业同事的帮助。哥伦比亚密苏里大学R.G. Hoft教授对本书给予有价值的支持，经常和威斯康星大学T.A. Lipo教授讨论是很有帮助的，而且也应感谢通用电气公司的同事F.G. Turnbull先生和R.L. Sfeigerwald博士。

美国通用电气公司 Bimal K. Bose

1980年8月于纽约

第一章 交流传动绪言

美国通用电气公司B.K.布什

许多工业都需要应用电机的变速传动。可能要求使用直流或者交流电机。直流电机的转速可用相控整流器控制电枢电压或者在直流供电时用直流一直流变流器来加以改变。在直流电机中,其转矩则决定于磁场磁通和在空间保持固定的直流电枢磁势 mmf 的乘积。在交流电机中,则由三相交流电源在气隙中产生的旋转磁场和转子的磁势 (mmf) 波相作用而产生转矩。在同步电机中,转子磁势是由流过直流电流的独立磁场绕组产生的,在感应电动机中,则由定子的感应效应产生。交流电机的转速和产生同步旋转磁场的定子电源的频率有关。如果增高频率以提高电动机的转速,那么气隙磁通的幅值则可由磁化电抗增加而降低,因而将使产生的转矩减小。基于上述理由,交流电机通常都要求用变压变频电源来控制转速。这种电源可用直流耦合的变流器系统(包括整流器和逆变器)或者交-交变频器获得。电机可用电流源代替电压源进行激励。使用电流源有一些优点但是电机运行要略为复杂一些。由于电压或电流波形是由变流器的固态开关产生的,波形的谐波将引起谐波发热和转矩脉动的问题。因为给电机供电的变流器比较贵,所以设计的极限最大功率实际上可比电机的功率小一些。因此和电机直接由电网供电相比较,对电机的特性是有影响的。一个理想的电压型逆变器从电机端子看其载维宁阻抗应当为零,同样,一个理想的电流型逆变器应有无穷大的载维宁阻抗。由于考

虑到价格,上述条件在实际上是难以满足的。有限的阻抗对传动系统的谐波性能和稳定条件都是有影响的。本章中将较为详细地介绍由变流器供电的交流传动系统的各种性能和控制特点。这些基础知识将有助于对较为详细介绍其特点的其他章节内容的了解。

1. 感应电动机传动

感应电动机的转速决定于转子的同步转速和滑差。同步转速与供电频率有关,但滑差可用调节供给电动机的电压和电流加以控制。有几种控制感应电动机转速的方法,例如:(1) 变压恒频式定子电压控制;(2) 变压变频控制;(3) 变流变频控制和(4) 滑差功率调节。现将这些方法的运行原理和特性叙述如下。

1.1 控制定子电压的传动

这是一种控制鼠笼型感应电动机转速的简单和经济的方法。本方案中供给定子的电压是电源频率,但用对称地控制三相电压触发角的方法加以控制。线路用图1所示反并联的晶闸管进行换流。在小功率应用中可只

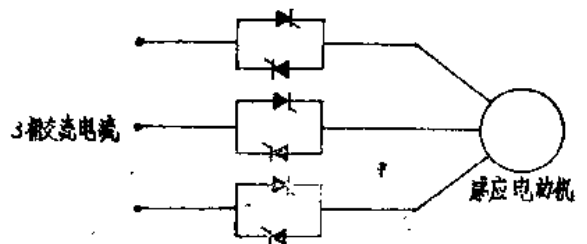


图1. 使用相控交流供电的感应电动机转速控制

用三端双向晶闸管开关元件,这就进一步简化了主回路和控制电路。定子电压可当触发角在 $120^\circ > \alpha > 0$ 范围内从零到全电压间变化,因此本线路有“固态自耦变压器”特性。当然负载和供电线路中将由变流器产生丰富的为频率整数倍的谐波。如果电机是星形接线且中性点绝缘,则可消除三次谐波。由于增加了谐波以及相控变流器要耗用附加的无功功率,使得电源线路侧的功率因数较自耦变压器控制的差。

虽然变流器非常简单,但传动系统的特性是不好的。主要用于低到中功率,特别是用于起动时转矩很低且随转速平方增加的泵或风机类负载。相控的单相小功率传动在仪表控制中得到广泛使用,此时由于价廉的优点而不考虑效率和功率因数。现在使用的另一领域是中到大功率感应电动机的固态起动器。此时电动机通常是空载起动,用定子电压控制可以限制冲击电流。在全电压和负载的正常运行情况下,用机械接点将晶闸管旁路以消除装置备用状态的损失。

有高滑差(典型值为10~12%)的电动机才适用这种调节方法,与此相应,电机的铜损较大。图2所示为风机典型传动的转速控制特性。因为在滑差固定时转矩随电压平方变化,故在定子电压降低时产生的转矩也相应地降低。在不同定子电压时的稳定转速由图中所示的交点确定。显然,如果电机是按低滑差设计的,速度的控制范围将缩小。另

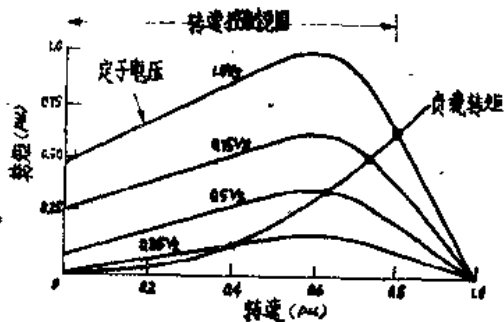


图2. 改变定子电压时感应电动机的转矩转速曲线

一方面,如果电机是按高滑差设计的(即有高的转子电阻),对于恒定转矩类型的负载可在整个转速范围内得到控制。对于这种调速方法,当用控制定子电压来降低转速时,定子电流每安产生的转矩将要减小。与定子电压和频率比值有关的气隙磁通,在电压降低时就降低。由于在电压降低时电流的幅值要增加才能产生相同的转矩,因此使得转矩/电流的特性很差。可以证明,对于风机类负载($T \propto N^2$)定子电流在66.7%同步转速时达最大值;对于设计满载滑差为12%,这个电流比满载额定电流高25%。当然谐波电流还要加到上述理论值上,同时在低转速时铜损较大,这可能导致电机严重发热。这种型式的传动适合于改变相序的方法进行制动,但附加的转子功率损耗将引起发热。基于上述的复杂性,这种电机—变流器系统应对每种不同特性要求的应用进行仔细的设计。

有许多种相控电路都可以用。图3和图4给出两种另外的实用电路。图3在三角形接线的控制器中一对晶闸管和三角形接线的每个绕组串联,因此每相都对线电压构成一个独立的单相负载。当相电流波形确定以后,线电流波形可用叠加的方法构成。这种接线的明显优点是晶闸管流过的基波电流较小,但是由于谐波电流较高而抵消了此优点。图4接在中性点的控制器是最简单的,但其谐波含量很厉害。在低转速下负载消耗的功率可能比用正弦波形电压控制的要高出100%。

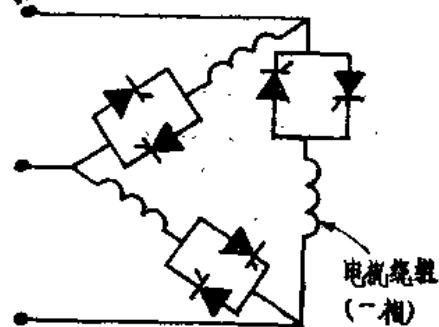


图3. 三角形连接的控制器的电路原理图

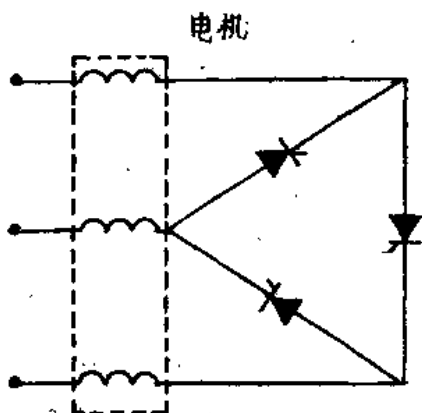


图4. 接在中性点的控制器

1.2 电压型方波逆变器传动

电压型逆变器分为方波逆变器和脉冲宽度调制逆变器两类。这种型式的逆变器在成功地解决了强迫换流技术后，从六十年代开始得到应用。图5所示为常用的方波逆变器传动的主回路接线。三相桥式整流器将交流电压转换成可调的直流电压，这个电压便是强迫换流桥式逆变器的输入端的电源。逆变器产生的变压变频功率用来控制电动机的转速。这种逆变器之所以称为电压型的是因为大的滤波电容器供给逆变器一个恒定电压，因而逆变器输出电压的波形不受负载性质的影响。正常情况下，逆变器桥臂上的每个晶闸管在 180° 内导通，在电机侧产生对直流

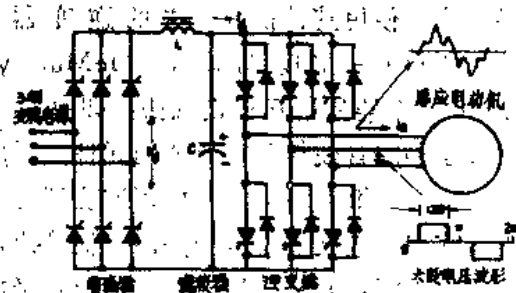


图5. 变压变频方波感应电动机传动
(没有画出逆变器的强迫换流)

电源虚中点而言的方波电压。线间电压则如图5所示为6段波形。由于感应电动机是滞后功率因数的负载，故逆变器的晶闸管要求强

迫换流。反馈二极管有助于负载的无功功率流入滤波电容器，并保持输出电压波被钳位在直流链电压水平上。这个二极管还在换流和制动过程中起作用，在下面还要加以阐述。

变压变频转速控制的理论可用图6和图7说明。这种型式传动中用的电动机是低滑差特性的，因此可以提高效率。可以简单地用改变电机的同步转速来改变电动机的转速，亦即改变逆变器的频率。但是当频率增加

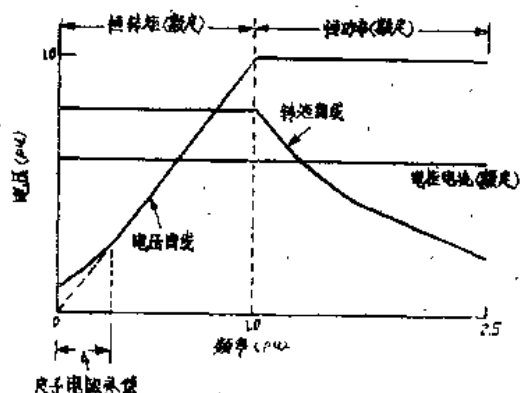


图6. 感应电动机的电压—频率关系

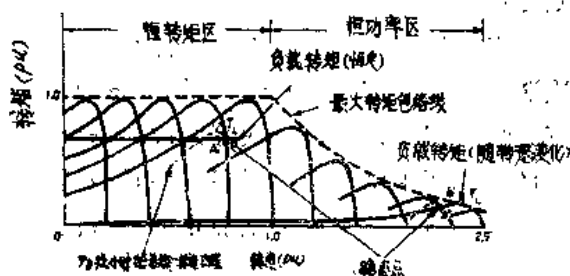


图7. 用变压变频电源的感应电动机的
转矩—转速曲线

时，电机的气隙磁通降低使转矩减小。如果电压随着频率变化并保持比值不变，也可同直流分激电动机那样保持气隙磁通恒定。图6所示为期望的电动机的电压频率关系。在基频(1.0PU)以下，气隙磁通用不变的伏/赫比值保持恒定以获得恒定的转矩。在非常低的频率下，定子电阻将超过漏抗，因此

要产生附加的电压来补偿这个影响。在基频时，由整流器最大触发角来产生电动机的全电压。超过基频时，当频率增加，由于气隙磁通减小而转矩减小。此时电动机在图示的功率恒定区内运行。这和用减弱磁场的方法来控制直流电动机的转速相似。电动机在转矩恒定和功率恒定区的转矩、转速曲线如图7所示，其中每根转矩—转速曲线与电动机端上特定的电压和频率组合相对应。图上分别给出对应于恒定和可变负载转矩的稳定运行点A和B。不管是在磁场恒定控制滑差或是滑差恒定控制磁场的方式下，电机都可在最大可能的转矩下从零加速到接近稳态运行点。在稳定运行中，调节磁通和滑差可以提高电机的效率。

电机的滑差可以控制成为负值，使得电机像感应发电机那样运行。此时惯性系统内储存的能量可以送回到直流侧。这个能量可用开关接入电阻加以消耗以实现传动系统的动力制动，或者可以接入与整流器反并联的附加相控桥以实现再生制动。可以增加相序变频来改变转速方向以实现这种系统的四象限传动性能。

电机端上的六段电压波形将产生 $6n \pm 1$ 次谐波（式中 n 为整数），亦即波形中存在有5次、7次、11次、13次等谐波。每个谐波电压分量产生比基频快得多的旋转磁场，因此转子对谐波看来好象是静止的。谐波电流的幅值取决于相应谐波电压的幅值和不受运行滑差状态影响的电机等效阻抗。因此在轻负载运行时，纹波电流可能超过基波电流。使用变压变频供电，谐波电流趋于保持不变，但在电机进入功率恒定区时，由于频率增加使得总的铜损减少而使谐波电流减小。对于恒定功率输出的电机必须考虑到谐波的发热效应来确定其结构尺寸。谐波的另—有害影响是电机的转矩脉动。可以证明，在最低的谐波频率（ $6f$ ）时，可由基波气隙磁通和5次、7次谐波电流相互作用产生谐波

转矩。这个谐波转矩的影响往往会被传动系统的大惯性滤掉。但不论怎样，假如在转矩的频率靠近系统的机械谐振频率时，将产生严重的振荡。逆变器输出电压的低次谐波可使用多相技术加以消除，即将移相逆变器的电压通过多绕组变压器或电机混合以产生12或24段波形。这种复杂和昂贵的系统只对大的功率传动才能适用。

由于直流链电压是用相控整流器产生的，输入功率因数在直流电压降低时将要恶化。线路电流波形是理想的6段波形，因此其谐波图形完全同逆变器的电压波形相同。线电流波形中的谐波也可用前述的多相技术加以改进。用简单的二极管桥式整流器再接以直流—直流变流器可以显著地改进线路的功率因数。

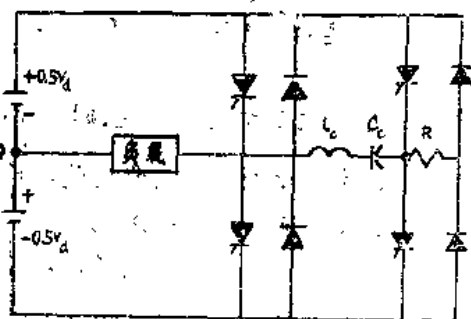
电压型逆变器的晶闸管已如前述需要强迫换流，在图5中逆变器要求在基频每周期内进行6次换流。在强迫换流时，预先充电的电容器在导通的晶闸管周围产生瞬时的电压或电流。这将引起主电流的转换并且在器件上产生的反电压将有助于将晶闸管关断。许多不同的换流技术都是可行的，在图8中仅列出几种常用的型式。McMurray, Verhoef 和 Brown Boveri 换流方案使用辅助换流原理，即用辅助晶闸管来关断导通的晶闸管。使用这种换流方法的逆变器完全适用于脉冲—宽度调制器。McMurray Bedford 逆变器使用互补换流法，即由接通的一只主晶闸管使得正在导通的元件关断。McMurray 和 Brown-Boveri 逆变器也称为电流式换流逆变器，因为旁路二极管流过换流谐振电流，并且只用二极管的压降来协助关断主晶闸管。其他两种称为电压式换流，这种换流是将大的电容电压加在导通的晶闸管的两端。

由于换流电容器通常是用直流链电压充电的，所以当直流电压降低时换流能力将要减弱。因此图5中的逆变器在直流链电压降

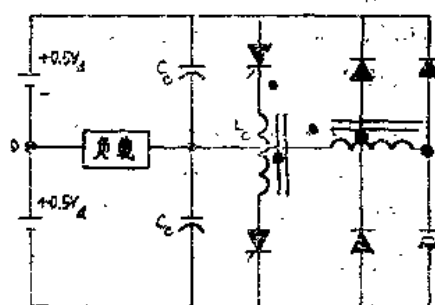
低时很快达到它的换流极限。基于这个原因，逆变器通常都设置一个辅助的，电压恒定的直流电源供换流之用。

电压型方波逆变器传动通常用于中小功率的工业上，转速比一般限制在10:1以内。

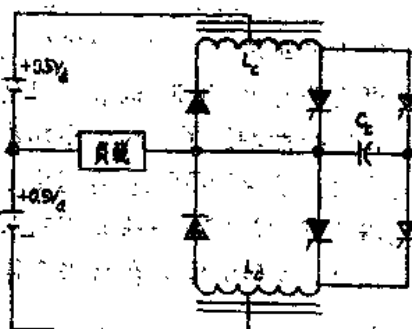
现在这种型式的传动已经大量地被PWM（脉冲宽度调制器）传动所取代。在下节中将要叙述。电压型逆变器适用于多电动机传动，该传动中许多感应电动机能紧紧跟踪。



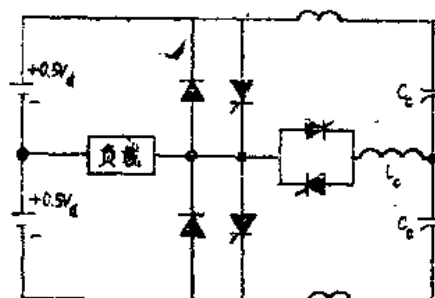
(A) MC MURRAY 换流



(B) MC MURRAY-BEDFORD 换流



(C) VERHOEF 换流



(D) BROWN BOVERI 换流

图8. 几种半桥逆变器的换流电路

1.3 PWM逆变器传动

在前节所述变压变频逆变器传动中可以使用二极管整流器因而不控制直流链电

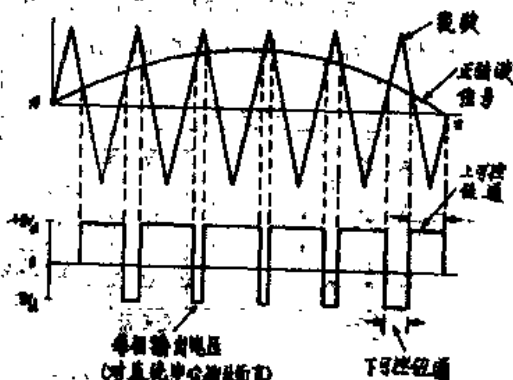


图9 脉宽调制原理

压，而在逆变器内使用脉冲宽度调制技术用电子方法来控制基频的输出电压。在这种方法中，晶闸管在半周内多次通断以产生谐波含量一般都低的变压输出。在几种PWM技术中，图9所示的正弦PWM较为普遍。用等腰三角形的载波和正弦信号相比较，其交点确定换流点。除了低频范围外，载频和信号同步，并保持载频为信号频率的偶数倍（且为三的倍数）以改善谐波含量。基波输出电压可用改变调制系数的方法加以变化。可以证明如果调制系数小于1，在输出端只出现与基波有关的旁频和载频谐波。这样的波形比起方波来显著地减少了谐波发热和转矩脉动。在调制系数为1以上时电压可

以增加,直到获得与方波方式相同的最大电压。因此PWM电压控制可以用于恒转矩区(见图8)而在恒功率区内则同方波传动完全相同地运行。

近来很注意PWM消除选定谐波的技术。方法是在方波的预定角度产生一些缺口,使电压控制能消除所选定的谐波。缺口角度可用程序确定使得在指定的负载条件下电流纹波的均方根值最小。微型计算机特别适用于PWM的这种型式,需要查找的角度表可以存放在只读存储器(ROM)中。在PWM的开关式控制法中,控制逆变器导通使得电流波保持在基准波滞后带范围内,其结果是电流的纹波较低。

在PWM传动中,虽然电机的谐波损失有了显著改善,但由于每半周要多次换流,逆变器的效率还是略有减小。在设计得好的PWM传动中,换流频率在器件允许的情况下应当提高,以便在逆变器损耗的增加和电机损失减少之间得到较好的平衡。在输入端使用简单和经济的二极管整流器改善了线路的畸变率和功率因数,减小了滤波器的尺寸并且提高了系统运行的可靠性。因为直流链电压比较恒定,晶闸管在全基波电压范围内的换流均能得到满足。另外,在低频区的谐波少和转矩脉动小,允许有较宽的转速控制。实际上具有可在电机带满转矩从静止起动的能力。因为直流链电压不需控制,所以许多独立控制的逆变器可以共用一个整流器供电运行,这就显著地节省了整流器的费用。本传动系统在交流电源失电时可用开关将蓄电池接入直流链的方法实现不间断运行。对于蓄电池或直流供电的传动系统,如像电车或地铁的驱动等,电源可直接吸收其再生制动功率。

在中小功率的应用中,逆变器中的晶闸管可用功率晶体管代替。在逆变器中使用晶体管的主回路接线示于图10,对于一定的功率要求,晶体管的价格要比晶闸管略高一

些,但是由于不用换流电路因而消除了相应的换流损失使得晶体管电路较为经济和有

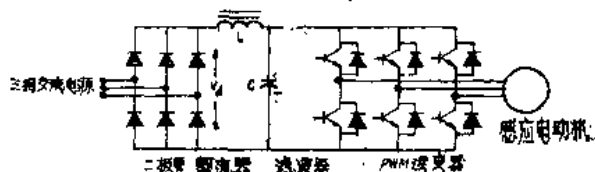


图10 感应电动机的变压变频PWM传动

效。因为晶体管开关的速度要高些,脉宽调制可以在较高频率下进行,这就进一步减少了电机的谐波损失。根据工艺条件,单片功率晶体管的典型额定值为500伏和200安是适当的。目前通用电气公司生产的集成功率达林顿(Darlington)模块(450伏,200安)已经用于电车传动系统。对于较高功率的应用,可用器件串-并联构成,但使逆变器的价格和复杂性增加了。对于小功率和较高频率的应用,功率MOS逆变器由于损耗更小且只需要低的门驱动看来是很有吸引力的。可以预计,MOS器件在将来会得到广泛的注意。

1.4 电流型逆变器传动

最近几年期间对可控电流逆变器有了广泛的兴趣。前而已经谈过电流型逆变器与电压型逆变器(理想的零载维宁阻抗)相反可以看作是一个恒流源(理想的无穷大载维宁阻抗)。图11所示为电流型逆变器传动的接线图而图12给出典型的相电压和电流的波形。相控整流器产生的可变直流电压用串联

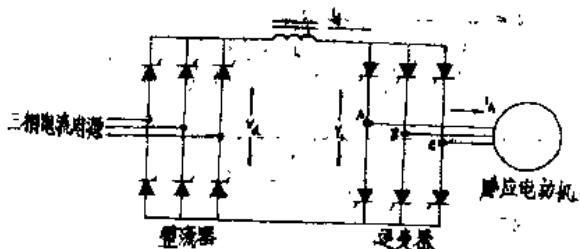


图11 变流变频的感应电动机传动
(没有画出逆变器的强迫换流)

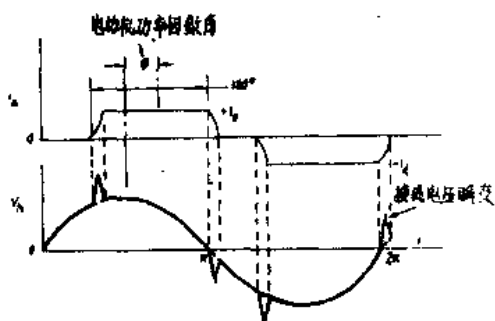


图12 电机的相电压和电流波形

大电感的方法转变成电流源。用二极管整流器接上直流斩波器也可以构成可变压的直流源。逆变器的晶闸管将电流源 I_d 对称地引入电机的三相产生变频的6段波形。考虑到电流源是保持恒定的，故电流波形不受负载特性的影响，这同电压型逆变器的电压波形是相对应的。可以证明电机的端电压是接近正弦的，只是叠加上有由换流引起的电压尖峰。

电动机在不同电流和固定频率下的转矩-转速特性如图13所示。例如，若电机以额定电流($I_d = 1.0\text{PU}$)运行，起动时产生的转矩与电压型逆变器相比是非常低的，这是由于电机的阻抗小而气隙磁通低的缘故。当电动机转速增加时，由于有较高的电动机阻抗故端电压上升，结果是转矩也因有较高的气隙磁通而升高。如不考虑电机饱和，转矩将升到如图中虚线所示那样高的值，然后在同步转矩时以很陡的斜率降到零。在实际的电机中受到饱和的限制，转矩只能是如图中实线所示的那样。额定电压时的转矩曲线

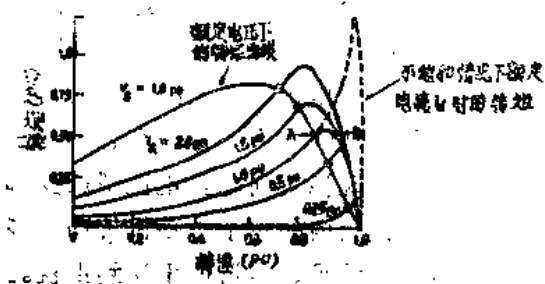


图13 感应电动机在不同电流时的转矩-转速曲线

也画在图13上，其负斜率部份才可认为能以额定的气隙磁通稳定运行。这曲线和 $I_d = 1.0\text{PU}$ 的转矩曲线在A点相交。在相同的转矩下电机可以在A或B点运行。在B点转子电流较低，但气隙磁通要高些并且已经部分饱和，这将引起较大的铁损和转矩的脉动效应。定子铜损稍微高一点。由于A点对应于常规的电压型逆变器在额定电流和气隙磁通下运行，故应优先考虑在A点运行。但是A点处于转矩曲线的不稳定区域，故传动系统需要闭环运行。在额定磁通下可用改变电流和滑差的方法(如图所示)来改变转矩，因此是在等效的电压转矩曲线的负斜率上运行。在转矩转速平面上可用变流变频供电确定不同的运行点，它可以落在与图7相似的转矩恒定或功率恒定区内。

电流型逆变器中的6段电流波形在低速时，可能引起转矩振荡的问题。如前所述5和7次谐波电流与基波磁通反应引起6次谐波转矩振荡。这可用调制直流链电流或在逆变器内引入少量的脉宽调制使其减小。6段电流波形也导致电机的高次谐波发热。如果电机的功率大，可用两个有相位移的逆变器运行以产生12段电流波形。12段逆变器的谐波发热和转矩脉动效应将显著减少。

由于感应电动机构成滞后功率因数的负载，逆变器的晶闸管要求强迫换流。图14、

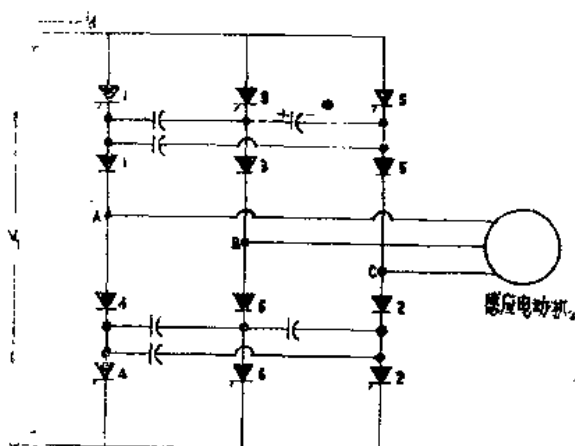


图14 自动顺序换流的电流逆变器(ASCI)

15和16 给出几种常用的逆变器强迫换流的型式。图14 所示的自动顺序换流逆变器(ASCI)用得非常普遍。用6个电容器和6个二极管构成强迫换流电路。二极管使电容器与负载隔离并有助于储存换流所需的能量。例如开始时晶闸管3是导通的,它可用触发随后进入导通的晶闸管5进行换流。晶闸管3被电容器加上的反电压关断,随后电流在谐

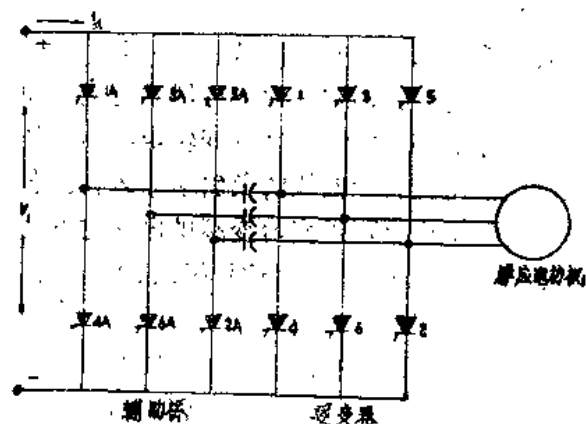


图15 有单独换流器的电流逆变器

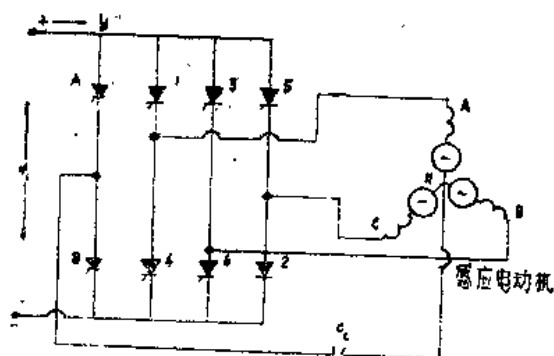


图16 用第4个桥臂换流的电流逆变器

振重叠角内从B相转换到C相,而此谐振重叠角是由直流电流的幅值,换流电容和电机的次暂态电感确定的。换流过程在电机端子上产生如图12所示的暂态过电压。电容值应在协调允许的暂态过电压和逆变器的最高运行频率情况下进行选定。图15所示为有独立辅助换流的逆变器。此时,辅助的晶闸管桥在三个电容器的配合下使逆变器的每个晶闸管都可单独换流、由于换流是用辅助器件进

行的,故换流时间较长,在高频时将导致转矩减少。图16所示为最简单的换流电路。电容器接在电机中性点和逆变器的第4个桥臂上。辅助晶闸管A负责桥上半部的换流,而B则使桥的下半部换流。在运行的一个周期中,电容器上的电压要变化6次。因此这个电路被称为三次谐波换流逆变器。这个电路虽然简单,但因为在高频时由换流引起的转矩减小得多,所以一般不用于感应电动机传动。

电流型逆变器传动的几个好的特性可归结如下。电力线路结实可靠,不可能像电压逆变器那样出现击穿故障。逆变器可从偶然性换流失败后自动恢复。逆变器侧任何故障引起的故障电流增长缓慢。并可用控制整流器的方法来消除。另外逆变器中的元件较少,换流损失也要少一些。由于只需控制6个晶闸管,所以控制电路比较简单和可靠,逆变器可以使用低速的晶闸管 and 二极管,所以价格便宜。电流型逆变器传动的一个重要特点是再生过程简单,主回路中不需要增加元件,再生期间电机以负滑差作发电运行,并且调节与电机电压波相对应的逆变器触发角使输入电压 V_1 极性反向。对于相同的 I_d 流向,整流电压 V_d 用延迟触发角而反向,因此功率也向反向流动。

尽管有上述优点,电流型逆变器还是受到一些限制。这种逆变器的频率范围较低并且不能空载运行,因为需要有一个最小的负载电流来满足逆变器换流的要求。大容量的直流链电感和换流电容器,使得逆变器的体积有些庞大和昂贵。由于换流与电机的次暂态电感有关,故在电机端子上出现大的瞬态过电压。这种传动的响应较慢并在轻负载高转速情况下会出现稳定问题。电流型逆变器用于大中功率范围内的单个电动机传动。多电动机运行有些困难,但目前正受到重视。

1.5 交—交变频器传动

交—交变频器将交流线路功率的一个频