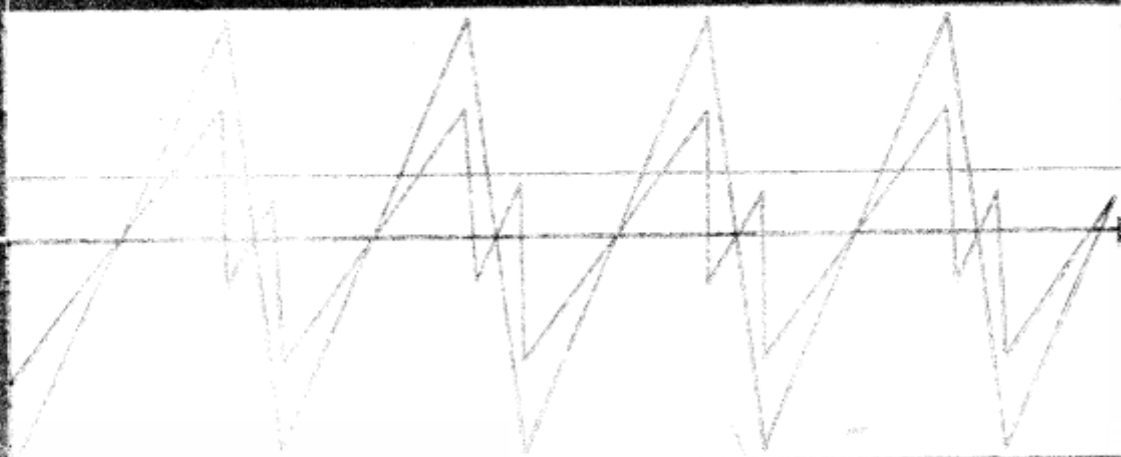
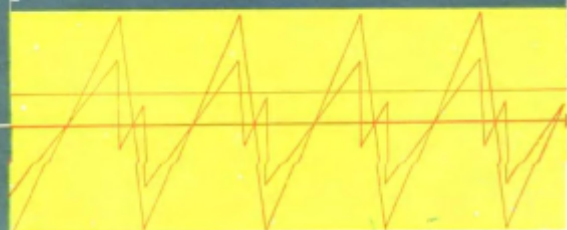


交流调速系统

交流调速系统



责任编辑：向 军

B. K. Bose

Adjustable Speed

AC Drive Systems

The Institute of Electrical and Electronics Engineers,
Inc, New York IEEE PRESS 1981

交 流 调 速 系 统

(美) B. K. 博 瑟

姚承三 谢桂林 黄 章 吴大同 顾永辉

邵继震 安昌山 梁汉布 林荣富 张效陶 王义门 译

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平门路14号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

开本787×1092¹/₁₆

印张38

字数911千字

印数1—2,750

1986年8月第1版

1986年8月第1次印刷

书号15035·2768 定价5.15元

译 者 的 话

随着功率电子学的飞速发展,广泛应用交流调速系统已是指日可待的事情。我国交流调速的研究工作正在受到普遍的重视。广大读者渴望有一本合适的入门书。

本书是根据B.K.Bose博士编辑的《Adjustable Speed AC Drive Systems》一书译出的。该书是一本系统介绍交流调速的论文集。作者是按照一个系统提纲进行选辑的。在内容上照顾了理论分析、控制技术、设计和应用等几个方面,所选的大都是理论阐述清晰、适于读者掌握基本概念的文章。尽管各文章可能存在详简不一,格调不同,以及内容上的某些重复,但总的来说,作者的尝试是成功的。对初学者,它不失为一本有价值的参考书。

参加本书翻译的有姚承三教授,谢桂林、黄章副教授,吴大同、顾永辉、郁继裳、安昌山、梁汉布高级工程师,以及林荣富工程师,张效陶、王义门讲师等。最后由谢桂林总审校。由于时间仓促,译文难免有错误和不妥之处,希望读者提出宝贵意见。

译 者

序 言

近十五年以来,用半导体实现交流电机速度控制的技术有了很大发展。传统的看法是,交流电机适于恒速运行的应用场合,尽管在半导体时代到来之前就已有了交流调速方法。这是因为这些方法大都结构复杂,效率不高,且造价昂贵。在很长一段时期内,直流电机一直被认为是工业调速应用的原动机。因此,当二十世纪五十年代后期晶闸管出现以后,立即被用在直流拖动的变流装置上。六十年代初,静止逆变器上使用了巧妙的强迫换流技术——这是一些著名学者的功绩,结果出现了有实用价值的,高效率的交流调速用静止型调压调频的电源装置。

交流电动机,尤其是鼠笼型感应电动机,与直流电机相比,具有以下明显的优点:造价低,重量轻,惯性小,效率高,坚固耐用,工作可靠,维护方便。由于没有换向器和电刷,适用于灰尘多、有爆炸危险的环境。尤为重要的是,交流电机的这些优点使得在某些应用领域内只能用交流拖动。此外,当多电机拖动需要精确调速,即要求准确的速度跟踪时,显然选用同步电动机是最合适的。

尽管交流电机有这么优点,但在与直流拖动的竞争中,妨碍它广泛应用的主要因素是,变流器的成本高和控制要求复杂。近年来,研究工作主要集中在这些方面。晶闸管的价格在不断下降,而性能却逐渐提高,其中包括电压和电流容量定额的提高。大功率晶体管的容量定额近来已有很大提高,它们已可使用于中小型拖动装置上。功率MOS器件也已涌现,光控晶闸管也已引起变流器应用方面的注意。采用集成化大功率器件代替分立半导体器件将有助于器件组装成本大幅度的降低。最终实现把集成化的变流器系统装在电机内的设想可能为期不会太远。由于大规模集成工艺的进展使电子控制装置的成本不断下降。以微型机为工具实现系统的控制,不仅使硬件系统大为简化,可靠性提高了,而且可以使拖动系统的性能实现最优化,这个作用是硬件控制所不能做到的。目前在电机设计方面的情况是,在不增加成本的条件下效率在不断提高。永磁式同步电动机正在被广泛采用,因为它不需要激磁电源,而且没有激磁铜耗。对本质上复杂的交流调速系统采用模型化和计算机仿真进行研究,在文献上已得到广泛注意。交流机的控制性能现在已完全能够与直流电机相媲美了。

从目前技术发展的趋势来看,交流调速的广泛应用在不久的将来肯定会实现。目前,在工程界渴望了解交流拖动的基本知识。遗憾的是,有关交流拖动的文献与日俱增,而且涉及各个不同方面,这就使想研究文献的读者无从着手。在这方面还未曾出版一本适用的教科书。

本书是为那些希望研究交流拖动并打算用这些知识去开发和设计拖动系统的工程师们而编写的,它还可做为研究生一个学期的课程。自然,我们假定读者已掌握了变流技术、电机和控制理论的基础知识。本书是由大量交流拖动文献中精选出来的50篇论文组成的。还包括编者专门写的一篇。论文选择的原则是:它们必须反映技术发展的主流,文字清晰简明,思路与表达统一。一篇写得出色的综述文章常常看做是主要的组成部分。但是即使

有了上述原则,挑选也不是很容易的,因为文献中优秀论文太多了。虽然国际上用英文出版的刊物都查找了,但论文主要是选自IEEE的期刊,而且选择的都是读者格外感兴趣的那些文章。

本书内容大体分为两部分:第一部分讨论感应电动机拖动,第二部分讨论同步电动机拖动。论文试图按照理论、控制、设计、应用的顺序编排。在书后还刊有推荐的参考书目。对于初学者,论文可能有些难于理解,为此编者自己撰写了第一篇。这一篇全面综述了交流拖动技术的文章,对各种不同类型的交流拖动给以简单明了的,而且不借助于数学的描述,以期为顺利研读以后诸篇打下基础。第二篇介绍定子相控调压的感应电动机拖动。这种类型的拖动具有变流器结构简单的优点,适用于中小容量的设备上。第三篇介绍由调压调频逆变器供电的感应电动机拖动系统。这方面的文献浩瀚,因此这篇所挑选的文章最多。第四篇讨论调频、电流可控的感应电动机拖动系统。这种系统由于具有引人注目的优点,已经受到广泛的重视。第五篇介绍带转差功率调节的感应电动机拖动系统,本系统必须使用绕线转子的感应电动机,变流器设在转子回路。这种拖动方式适用于大功率且调速范围不大的应用场合。第六篇论述用可控电流型逆变器供电的同步电动机拖动系统。这种拖动形式一般需要由轴位置检测信号产生逆变器的触发脉冲,即平常所说的无整流子直流电机(CLM)或电子换向型直流电机(ECM)。第七篇讨论用交-交变频器控制的同步电动机拖动系统。本书未包括交-交变频器供电的感应电动机和调压调频逆变器供电的同步电动机拖动系统,但这并不意味着它们不重要。同样也没包括常用于小容量设备上的单相交流拖动。我们所选的只是专门讨论交流拖动系统的论文,但在一些情况下也有例外。

最后,在编辑中得到了我的一些同行,密苏里大学的R.G. Hoff教授,威斯康辛大学的T.A. Lipo教授,以及通用电气公司的同事F.G. Turnbull先生和R.L. Steigerwald博士的建议和帮助,在此表示感谢。

B.K. 博瑟

1980.10.8

目 录

序 言

第一篇 交流调速导论 1

第一部分 感应电动机拖动

第二篇 相控变流器拖动 28

感应电动机调速的定子调压法 28

相控交流拖动系统的对称三相电路的比较 36

对称触发晶闸管电压控制的感应电动机的分析 49

使用大功率晶体管的三相交流功率控制 62

带锁相环调节的双向可控硅交流调速系统 72

固态交流启动器的设计与应用 81

第三篇 电压型逆变器拖动 89

宽调速范围交流异步电机拖动用的静止逆变器 89

整流器-逆变器异步电动机拖动的分析和简化表示法 98

整流器-逆变器异步电动机拖动的稳定性分析 111

带改进脉宽调制逆变器-电动机拖动系统 130

晶闸管逆变器的谐波消除和电压控制的一般方法——谐波消除 141

晶闸管逆变器的谐波消除和电压控制的一般方法——电压控制方法 153

脉宽调制逆变器-感应电动机拖动系统中的谐波效应 165

逆变器供电感应电动机的转矩脉动 177

可控转差的静止逆变器拖动 185

可控电流型脉宽调制晶体管逆变器 193

由变频调压电源供电的感应电动机的磁通控制方法 206

磁场定向原理在交流电机闭环控制系统中的应用——矢量变换控制 216

用微处理器实现的标准交流电动机磁场定向控制 221

逆变器-感应电动机拖动的电机车 231

交流调速传动应用的若干准则 246

第四篇 电流型逆变器拖动 258

用于交流电机拖动的电流源逆变器 258

用于单相交流电机异步牵引电机的大功率逆变器 265

感应电动机用的可控电流逆变器的两种换流电路的分析比较 275

用状态变量对可控电流感应电动机拖动的稳态分析 291

用D-Q模型对感应电动机拖动系统控制环路分析 304

可控电流感应电动机拖动系统模型的建立和设计 316

电流源供电感应电动机拖动中转矩脉动的分析和控制 330

交流感应电动机拖动的同步控制 340

高性能的可控电流逆变器拖动系统.....	350
新型电流源逆变器.....	364
第五篇 转差功率控制的拖动	371
转子有静止逆变器的感应电动机转速控制.....	371
感应电动机使用可控硅逆变器时转差功率的回收.....	383
给水泵用大功率感应电动机的无整流子Krämer调速系统	394
感应电动机的转子斩波器控制——时间比控制法.....	403
泵和压缩机用的交流调速拖动系统.....	413
大型绕线型感应电动机调速装置的定子有功和无功功率控制.....	420
第二部分 同步电动机拖动	
第六篇 电源型逆变器拖动	432
应用电流源逆变器的同步电动机拖动.....	432
无整流子直流电动机的闭环控制及其简化模型.....	438
电流源逆变器供电的自控同步电动机的动态特性.....	449
电流源逆变器供电的同步磁阻电机的稳定性.....	464
电流型线性感应电机的控制与仿真.....	479
轧钢机用无整流子直流传动装置.....	492
负载换流同步电动机传动装置的新型强迫换流起动电路的分析.....	506
大型同步电动机用静止变频起动和传动装置.....	521
电机换流逆变器-同步电动机传动装置的使用和定额	535
第七篇 周波变流器控制的拖动	550
交流无整流子、无电刷电动机.....	550
同步电动机牵引的有轨电车.....	564
St. Lawrence水泥厂8750马力无减速齿轮球磨机的电气装备	578
无齿轮管型磨的拖动系统和电子控制设备.....	588

第一篇 交流调速导论

BIMAL K. BOSE

在工业中有很多场合需要采用可调速的电力拖动。为实现这个要求可以用直流或交流电动机。直流电动机的调速可通过相控整流装置控制电枢电压来实现,当供电电源是直流时,可通过直流-直流变换器实现电枢电压控制。直流电动机的转矩与磁场磁通量和电枢磁动势的乘积成正比,磁通量和磁动势在空间是不动的。对交流电动机,三相电源在气隙中产生一个旋转磁场,此磁场和转子磁动势相作用产生转矩。转子磁动势在同步电机中是由单独的励磁绕组通入直流电流产生的,而在感应电动机中它是靠定子绕组的感应产生的。交流电机的转速与定子供电源的频率有关,后者产生同步旋转的磁场,当增高频率以提高电动机转速时,气隙磁通将由于激磁阻抗的增大而降低。因此对交流调速电动机一般需要配置一个频率可调,电压可调的供电电源。这种型式的电源装置可以是带有中间直流环节的逆变装置,也可以是交-交变频装置(周波变换器)。电动机可以由电流源而不用电压源供电。使用电流源有很多优点,但电机控制稍微复杂一些。由于电压或电流波形是通过变流装置的半导体开关形成的阶梯波,其产生的谐波将引起发热和脉动转矩问题。变流装置造价昂贵,并且设计的额定峰值功率限值大大低于电动机的过载能力。如果和由公共电源供电时的性能相比,由变频装置供电时电动机的性能是下降了。理想的电压型逆变器的等效内阻应为零,同样,理想的电流型逆变器的等效内阻应为无限大。从成本方面考虑,要满足上述要求实际上是困难的。电源阻抗的大小对谐波特性和拖动系统稳定性会有一些影响。本篇对各种变流器供电的交流拖动系统的性能和控制方式进行较详尽的讨论。这里所介绍的基本知识对以后诸篇内容的研究会有所裨益。

1. 感应电动机拖动

感应电动机的转速决定于同步转速和转子的转差率。同步转速是与电源频率相关联的,而转差率可以通过调整供给电动机的电压和电流来加以控制。感应电动机转速控制的方法有若干种:(1)定频调压或定子电压控制;(2)调压调频控制;(3)调流调频控制;(4)转差功率控制。对这些方法的工作原理和特性分述如下。

1.1 定子电压控制的拖动

这是一种鼠笼型感应电动机的简单经济的调速方法。在此线路中通过对用于控制三相电源通断的反并联可控硅的触发角进行对称控制来实现定子电压控制,如图1所示。在小功率情况下可采用双向可控硅以简化主回路和控制回路。定子电压可以从零到最大值连续变化,与此相对应的触发角为 $0^\circ < \alpha < 120^\circ$,这样的装置具有《固态交流调压器》的特性。自然在负载上和电源线上将出现由变流器产生的、为电源频率整数倍的多种高次谐波。如果电动机是星形接法,则三次谐波将被抵消掉。电源侧的功率因数比用自耦变压器控制时低,因为增加了谐波分量和相控变流器所需的附加无功功率。

虽然变流装置简单，但拖动系统的性能差，它适用于中小容量的设备上，尤其适用于水泵或鼓风机类型的负载。在此情况下，负载力矩在起动开始时很小，而后按速度的平方增加。相控单相小功率拖动是应用广泛的一种调速方式，它是以牺牲效率和功率因数为代价来换取低成本的优势。近年来出现了用于大中型感应电动机的半导体起动器。它一般用于空载起动情况下，调整定子电压以限制冲击电流。在正常运行时，电动机是全压的，为此常常用机械式的接触器将可控硅短接，以消除在元件上的持续损耗。

采用高转差率电动机（典型的额定转差率为10~20%）进行速度控制时，在电机中会引起较高的铜损耗。图2示出的是鼓风机型拖动的速度控制特性。当定子电压降低时电动机转矩随之降低，在某一固定转差率下转矩和电压的平方成正比。在不同定子电压下的稳定速度由两条特性的交点确定，如图所示。显然，如果选用的电机是低转差率的，其调速范围将缩小。另外，电机设计为高转差率的（即高转子电阻），对恒转矩型负载能够实现全范围的速度控制。在这种速度控制方法下，当定子电压为实现速度控制而降低时，一定的定子电流（安培）产生的转矩将减少。气隙磁通与定子电压和频率之比有关，它随电压的降低而降低，因此在同样的转矩下，电压低则电流值将增大，故而转矩/电流特性变坏。可以证明，在鼓风机负载（ $T \propto N^2$ ）下，定子电流在转速为同步转速的66.7%时达到最大值。对满负载下转差率为12%的电动机，此最大电流值比满负载下的额定电流高25%。当然，谐波电流加在上述理论电流值上，再者在低速下铜耗增高，将使电机发热问题严重。这种拖动型式还适于采用反接制动（将电源相序反接），此时转子电能的额外消耗更加重了电机的发热。由于上述的麻烦，这种拖动系统须根据每个用途和需要的性能指标进行仔细地设计。

虽然有很多种可能的相控线路，这里介绍两种实用线路，示于图3和图4。在角形接法的控制线路中，每对晶闸管与一个绕组串相接，并且每相构成一个独立的线-线单相负载。一旦相电流的波形确定了，线电流的波形即可通过叠加法得到。这种接法的一个明显的优点是，晶闸管通过的基波电流较小。但谐波电流较大，又抵消了它的优点。连接中性点的控制线路如图4所示，是最简单的接法，但谐波分量非常严重，在低速下负载消耗的功率可以比在正弦电压控制下的功率消耗高出一倍。

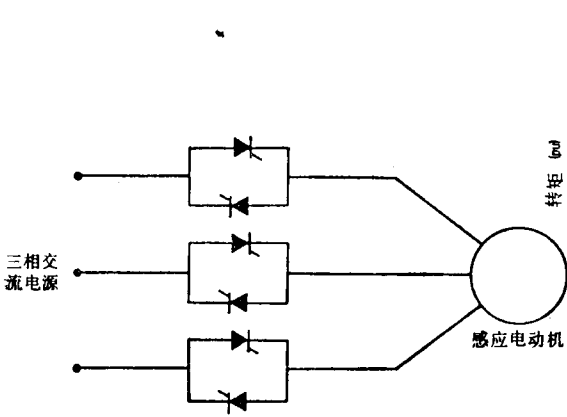


图1 由相控交流电源供电的感应电动机的速度控制

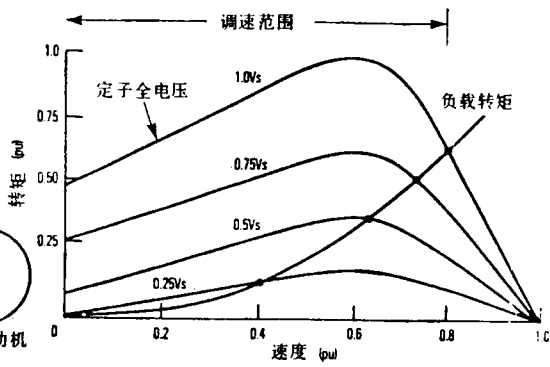


图2 改变定子电压时感应电动机的转矩-速度曲线

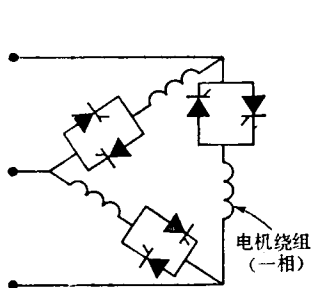


图 3 角形接法控制器

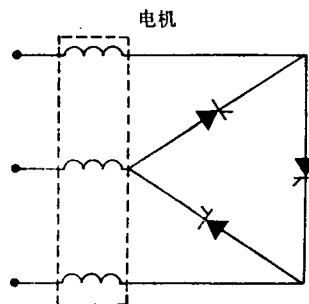


图 4 连接中性点的控制器

1.2 方波电压型逆变器拖动

电压型逆变器一般分为两类：方波型和脉宽调制型。电压型逆变器是在60年代初期出现的，当时成功地采用了强迫换流技术。图5示出的是一种常见的方波逆变器拖动的主电路。通过三相桥式整流器将交流变换为可变直流，将直流接到带强迫换流的桥式逆变器的输入端。逆变器做为一个电压可变、频率可变的动力源，用以控制电动机的转速。逆变器所以称为电压型是因为电路中设有一个很大的滤波电容器，以保证逆变器输出电压的稳定和输出电压波形不受负载性质改变的影响。逆变器桥臂的每个晶闸管通常导通 180° ，在电机各相和直流电源的人为中性点间分别产生一个方波电压。线-线电压将是一个六阶梯的波形，如图所示。由于电动机是一个功率因数滞后的负载，所以逆变器的晶闸管需要强迫换流。反并联二极管的作用是将无功功率反送到滤波电容器中，并维持输出电压，使之钳位在直流中间环节电压水平。二极管还参

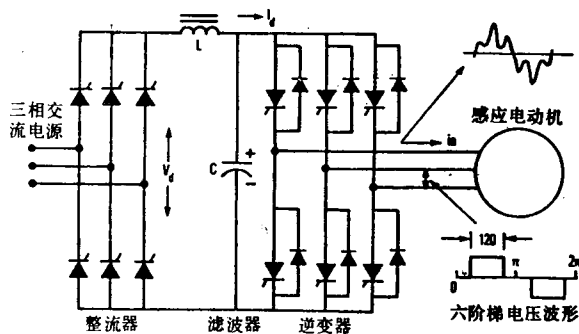


图 5 调压调频方波逆变器拖动（强迫换流回路未示出）

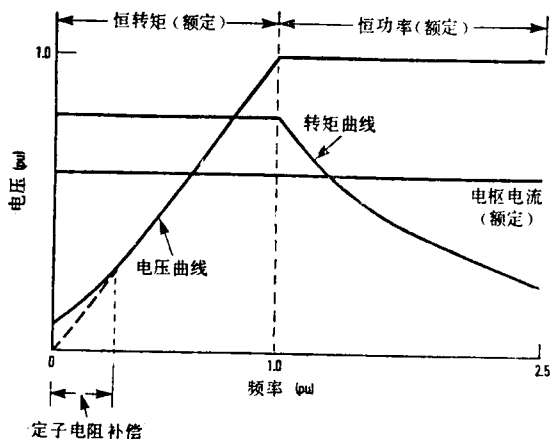


图 6 感应电动机的电压-频率关系

与换流和制动过程，解释见后。

电压可变、频率可调的调速方法的原理，可借助图6和图7解释之。用于这种拖动型式的电动机一般具有低转差率特性，因此效率较好。电动机的转速可简单地靠改变电机的同步转速，即变频器的频率来改变。但是，当频率增高时，电动机气隙磁通下降，使输出转矩降低。气隙磁通可以做到象直流分激电机那样维持恒定不变，如果电压能够随着频率的改变而改变，并且使电压/频率的比值保

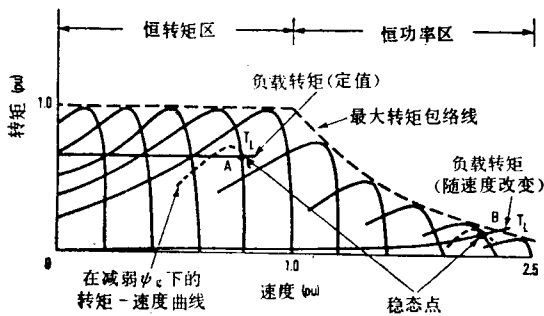


图 7 由调压调频电源供电的感应电动机的转矩-速度曲线

降,此时电动机工作在恒功率特性下,如图所示,这点和直流电机的弱磁调速的情况一样。电动机在恒转矩区和恒功率区的转矩-速度特性(即机械特性)示于图7。图上每条特性曲线对应于某一电压和频率,两个稳态工作点A和B分别对应于恒定转矩和变动转矩两种情况。电机以最大转矩从零速度开始加速,然后按恒定磁通下的转差控制方式或按恒定转差率下的磁通控制方式使电机逐渐趋向稳态点。在稳态工作下对磁通或转差率同时进行调整,这样可使电机的效率得到改善。

在转差控制下,电机转差率可以等于负值,此时电动机做为感应发电机运行,将贮存于系统惯量中的能量反馈到直流侧。这个能量可以消耗在动力制动电阻中,也可以通过另一组反并联的相控整流桥反馈到交流电网。电动机反转可以靠相序反接实现,这样,系统将得到四象限运行特性。

在电机端加的电压为六阶梯波形,这表明它含有 $6n \pm 1$ 次谐波。式中的 n 为任意整数,即有5次,7次,11次,13次等谐波存在。每一谐波电压分量产生一个旋转磁场,这些磁场比基波磁场的旋转速度快得多,因此对谐波来说转子好象是不动似的。谐波电流的大小取决于该谐波电压和电机的等值阻抗,就是说它不受运行转差率大小的影响。因此,在轻负载运行条件下,脉动电流可能超过基波电流。在电压可变频率可变的电源下,谐波电流趋于保持恒定。但是当电机运行在恒功率区段时,由于频率增高,谐波电流将衰减,结果使总铜耗降低。在确定电机机座号大小时,对谐波的发热效应必须考虑进去。谐波的另一个有害的影响就是使电机轴上出现脉动转矩。可以证明,最低频率($6f$)的谐波转矩就是基波气隙磁通和5次及7次谐波电流相互作用产生的。谐波转矩的影响可以由拖动系统的大惯量来消除。然而,如果转矩频率与系统的机械共振频率相接近时,可能发生严重的追逐现象(hunting)。逆变器输出电压中较低次谐波可借助多相技术来消除,如经多绕组变压器或电机将若干个经移相的逆变器电压合成为12或24阶梯波的输出电压。象这样一些复杂且昂贵的系统只有对大功率拖动系统才可能用得上。

由于直流中间环节的电压是从相控整流器得到的,因此当直流电压降低时,电网输入功率因数将变坏。线电流波形在理论上是六阶梯形,因此它的谐波分量和逆变器电压波形的谐波分量是一样的。线电流波形中的谐波也可用上述的多相技术加以改善。用简单的二极管整流桥,后面再接直-直变换器,这样可大大改善线路的功率因数。

持一定。图6示出的是需要的电动机电压-频率关系。在低于基本频率(1.0 pu^*)的情况下,气隙磁通靠维持电压/频率比等于常数来保持恒定,从而使电机能输出的最大转矩保持不变。当频率甚低时,定子绕组电阻占感抗的相当比重,所以需要适当增加电压以抵消这个影响。在基频下,电机加的是全电压,此电压是整流器的触发角移至最前时所确定的电压。当频率再增高时,转矩由于气隙磁通的减少而下

* pu标么值。——译注。

电压型逆变器的晶闸管需要采用强迫换流，图5示出的逆变器在每一基波周期内需要六次换流。在强迫换流中，由一个预先充好电的电容器产生一个瞬时电压或电流，加在正在导通的晶闸管上，于是引起主电流从晶闸管移去，并加上一个反向电压以促使其关断。换流的方法很多，图8示出的仅是一些常用的方法。McMurry, Verhoef和Brown Boveri换流线路都是按辅助换流原理工作的，即用辅助晶闸管来关断正在导通着的晶闸管。使用这种换流方式的逆变器最适于进行脉宽调制。McMurry-Bedford逆变器采用的是互补换流方式，即开通一个主晶闸管便使另一个导通着的元件关断。McMurry和BB逆变器也称做电流换流逆变器，因为换流谐振电流是流经旁路二极管的，利用二极管有限的管压降来促使晶闸管关断。其余两种线路称为电压换流型，在该线路中电容器的高电压反极性加在导通着的元件两端上。

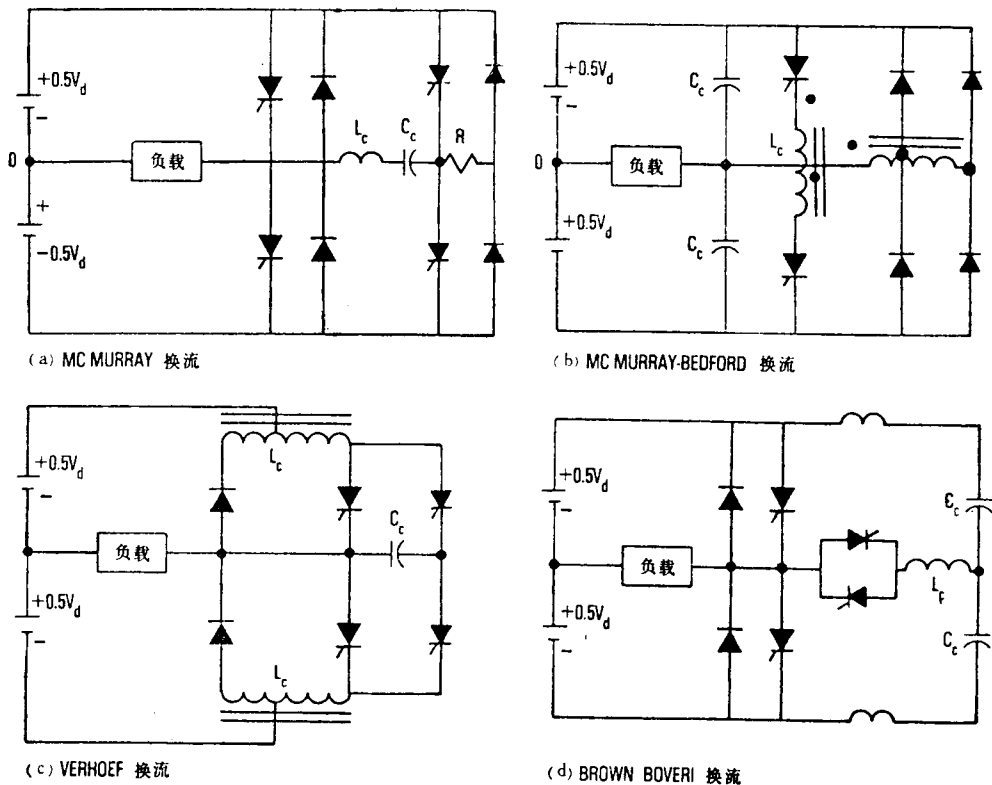


图8 半桥逆变器的若干种换流线路

由于换流电容器常常是由直流环节的电压充电的，所以当直流电压减小时，线路的换流能力将恶化。在图5所示的线路中，当直流环节电压降低时，逆变器很快就达到了它的换流极限。由于这个原因，逆变器一般设有一个辅助的直流恒压源做换流之用。

电压型方波逆变器拖动在工业中一般用在中小容量、调速范围不大于10:1的情况。最近这些装置已大部分被PWM拖动所取代（详见下一节）。电压型逆变器特别适用于多电机的拖动系统，它能使若干台感应电动机较好地同步运转。

1.3 PWM 逆变器拖动

在上一节讨论的变压变频逆变器拖动中，直流中间环节可以通过不可控的二极管整流

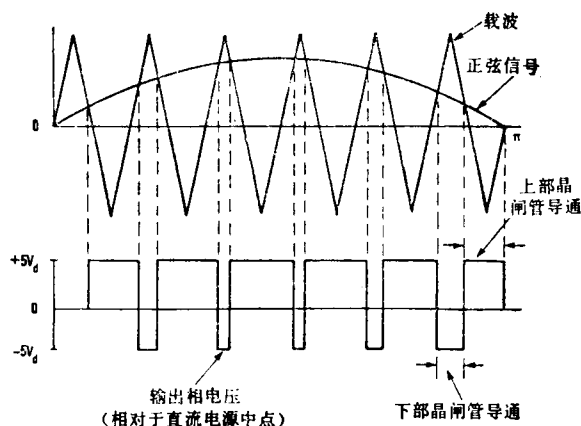


图 9 脉宽调制的工作原理

含量。基波输出电压是靠改变调制指数来改变的。可以证明，如果调制指数小于 1，则在输出电压中只出现有载频与基频的相关边频带。这样的波形所引起的热效应和脉动谐波比方波时少得多。增加电压可以达到让调制指数超过 1，此时得到的最大电压是方波。因此 PWM 电压控制只用在恒转矩区段（见图 6），在恒功率区段，其工作情况同于方波拖动。

利用脉宽调制可以实现有选择地消除谐波，这项技术近来得到广泛的注意。这种方法是将波形的缺口预先选择在方波的某些角度上，使得输出电压不含有某些预选的谐波。缺口的角度还可以这样确定：使在特定负载下的脉动电流的有效值为最小。微型计算机特别适用于这种 PWM 控制，角度的查寻表可存在 ROM 中。PWM 还可采用两态法（bang-bang method）进行控制，逆变器的通断是按下列要求进行的：使电流波形限制在以参考波形为中心的侧限带内，结果使脉动电流很小。

虽然采用 PWM 拖动会使电机的谐波损耗得到很大改善，但逆变器本身的效率却有所降低，这是因为每半周期内要进行多次换流。在一个设计得较好的 PWM 拖动中，换流频率选择适当，以期在逆变器损耗增加和电机损耗减少之间得到有利的平衡。由于装置的前一部分使用了简单便宜的二极管整流器，从而改善了电网的波形畸变和功率因数，减小了滤波器的尺寸，同时也提高了系统运行的可靠性。由于直流中间环节的电压是大致恒定不变的，因此在整个基波电压调整范围内均能满足晶闸管可靠换流的要求。此外，在低频段谐波分量低，脉动转矩小，因此允许的调速范围很广。由于直流侧的电压是不可控的，因此若干个单独控制的逆变器可以共用一个电源，这样就大大节省了整流器的投资。拖动系统还可设计成不中断电源的，当交流电网出故障时，自动换接到直流侧的蓄电池上。对于用电池或直流电源供电的拖动系统，如电机车或地铁，此时电源还可以直接吸收反馈制动的功率。

在中小功率的应用中，逆变器的晶闸管可用大功率三极管代替。用大功率三极管组成的逆变器线路示于图 10。使用晶体管时成本较晶闸管稍有增加，但由于没有换流回路和换流损失，使得晶体管线路具

得到。基频输出电压可采用脉宽调制 PWM 方法来控制。这个方法是：在一个基频半周期内，晶闸管均通断若干次，产生一个可变的，同时含有较低谐波分量的输出电压。在若干种脉宽调制方法中，最常用的是正弦波 PWM，如图 9 所示。用一个等腰三角波的载频与正弦信号相比较，由它们的交点决定各换流点。除了低频以外，载频和正弦信号之间不仅需要同步，而且需要维持整数比（3 的倍数）以改善谐波

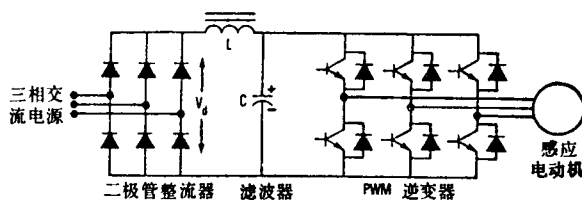


图 10 调压调频 PWM 感应电动机拖动

有更经济、效率更高的优点。由于晶体管的开关速度快, PWM可在更高频率下工作, 因此可进一步减少电动机的谐波损失。目前单片大功率晶体管的典型定额已达500伏和200安。最近通用电气公司正将集成化大功率复合管(450V, 200A)应用在电机车拖动系统上。如将元件串并联连接, 可获得更大容量的应用, 但这将使逆变器成本增高, 结构复杂。对小容量高频装置逆变器, 大功率MOS的采用具有很大的优势, 因为它的损耗低, 门极触发功率小。可以预料, MOS器件在不久的将来会得到广泛的发展。

1.4 电流型逆变器拖动

近年来, 可控电流型逆变器拖动受到了广泛的注意。电流型逆变器不同于电压型逆变器的地方就在于它是一个电流源, 其等效内阻的理想值等于无穷大, 而电压型逆变器的理想等效内阻值等于零。图11示出的是电流型逆变器拖动的原理接线图, 图12示出其典型的电压和电流波形。相控整流器产生可变的直流电压, 在此电压上串接一个大电感即形成一个电流源。二极管整流器再接上一个直流斩波器同样可以组成一个可调压的直流电源。逆变器的晶闸管控制着电流源 I_d , 使之对称地流向三相电机的各相, 形成频率可变的六阶梯电流波形。由于电源内阻很大, 因此电流波形不受负载性质的影响, 这点和电压型逆变器的电压波形不受负载性质影响是类似的。电机的端电压如图所示, 近似正弦波形, 波形上还叠加有由于换流产生的脉冲电压。

在固定频率下, 电动机在不同电流时的转矩-速度特性示于图13。如果电机工作在额定电流下($I_d = 1.0 \text{ pu}$), 其起动转矩要比额定电压下的起动转矩低得多, 因为此时气隙磁通很弱(由于电机的阻抗很低)。当电机速度增加时, 电机的端电压由于电机阻抗增大而增高, 结果气隙磁通增大, 转矩也增大。如果不考虑电机的饱和影响, 则电

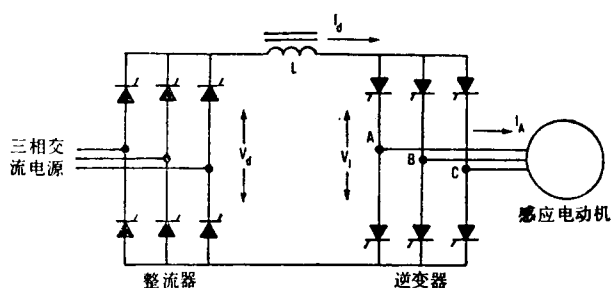


图 11 调流调频式感应电动机拖动

(图中换流回路未示出)

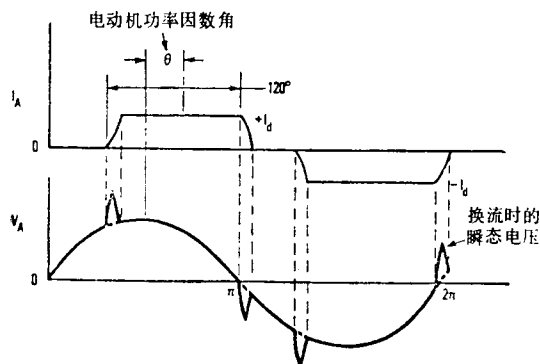


图 12 电机相电压和相电流波形

机转矩将上升到很大, 如图中虚线所示。然后在达到同步速度时转矩急剧下降至零。但在实际电机中, 饱和将限制其产生的转矩, 如图中实线所示。在额定电压下电机的机械特性也示于图13中, 曲线的负斜率部分就是在额定气隙磁通下的稳定工作区。此曲线与 $I_d = 1.0 \text{ pu}$ 转矩特性相交于A点, 在同一需要的转矩下, 电机可工作在A点或B点。在B点, 转子电流较小, 但气隙磁通较高, 由于部分饱和使铁损增大和引起转矩脉动。工作在A点和B点时, 定子损耗是一样的, 但是

是在A点的转子损耗稍高。由于A点相当于由一般的电压型逆变器供电并工作于额定电流和额定气隙磁通的情况, 因此工作在A点更合适。但是由于A点是处于机械特性的非稳定

段, 因此拖动系统必须工作于闭环状态。在额定磁通下的转矩可由改变电流和转差率来改变, 如图所示。这样, 工作点相当于落在额定电压下的机械特性曲线的负斜率部分。在转矩速度坐标上的各工作点或位于恒转矩区段或位于恒功率区段, 工作点的改变借助于电源电流的频率的改变, 同于图 7 所示的情况。

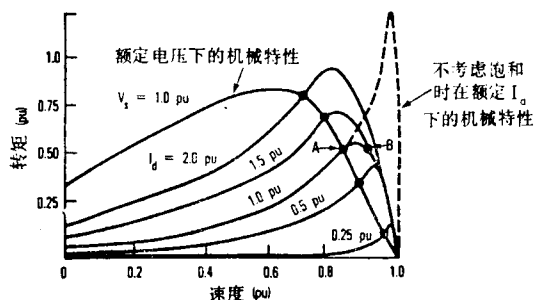


图 13 感应电动机在不同电流下的机械特性

大为减小。

由于感应电动机是属于滞后功率因数的负载, 因此逆变器的晶闸管需要采用强迫换流。图14、15、16示出的一些常见的强迫换流型逆变器。图14示出的自序换流逆变器 (Auto-Sequentially Commutated Inverter, ASCI) 是最常用的一种。六个电容器和六个二极管组成强迫换流电路。二极管的作用是使电容器与负载隔离并帮助贮存换流用的能量。譬如, 开始时晶闸管 3 处于导通状态, 触发并接入晶闸管 5 即可将管 3 关断。管 3 的关断是靠电容器的反向电压。接着在谐振换向的重叠角期间内, 电流从 B 换至 C 相。重叠角的大小决定于直流电流的大小、换流电容量的大小和电机的次瞬变电抗值。在换流过程中会引起在电机端出现瞬变过电压, 见图12。需要的电容量要综合考虑瞬变过电压和逆变器最高工作频率来确定。图15示出的是带有独立的辅助换流回路的逆变器。由辅助晶闸管组成的三相桥借助于三个电容器可以对逆变器的任意一个晶闸管进行单独换流。由于换流是

电流型逆变器六阶梯电流波形在低频下可能引起转矩振荡。5 次和 7 次谐波电流与基波磁通相作用可以产生 6 次谐波的振荡转矩, 解释同前。为了减少这个振荡转矩, 可对直流侧电流进行调制, 或者在逆变器中引入一些脉宽调制。六阶梯波电流还会在电机中造成高次谐波发热。如果电动机功率较大时, 可以使用两台逆变器, 经过移相, 产生 12 阶梯波形的电流。12 阶梯逆变器的谐波发热和脉动转矩都将

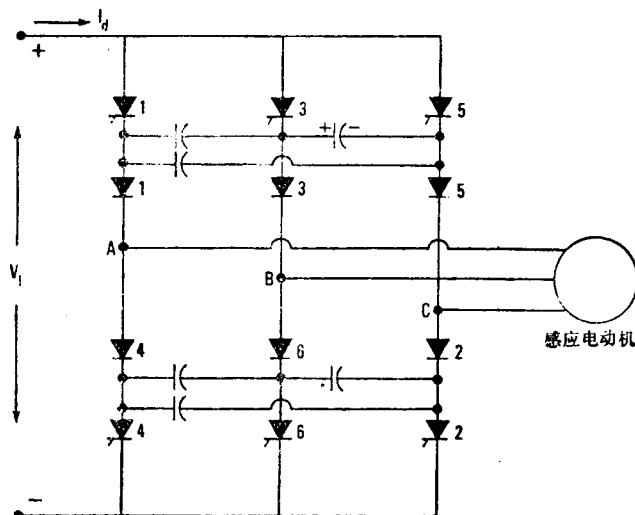


图 14 自序换流的电流型逆变器

通过辅助元件实现的，换流时间加长，这在高频下将引起转矩大幅度降低。图16示出的是最简单的换流回路，一个电容器接于中性点和逆变器的第四臂之间。辅助晶闸管A做桥的上半部元件的换流之用，管B用于下半部元件的换流。在一个周期内电容器电压变化六次，所以该电路称为三次谐波换流逆变器。此电路虽然简单，但不适用于感应电动机拖动，因为在高频下，由于换流将使转矩大为降低。

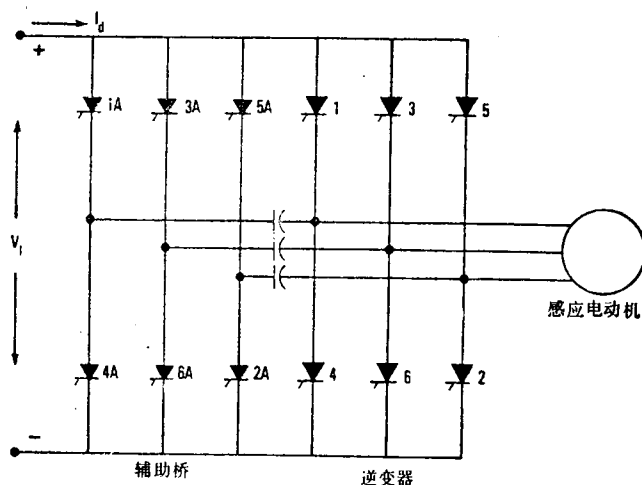


图 15 带独立换流电路的电流型逆变器

电流型逆变器拖动具有一系列优点，可概括如下：主回路坚实可靠，不存在象电压型逆变器中出现的那种短路故障，它可以从偶然的换流失败中恢复过来。当逆变器输出侧出现任何短路时，短路电流的增长缓慢，这个电流就有可能用控制极封锁的办法来切除。这种逆变器除了有使用元件少的优点外，其换流损耗也较低。由于只有六个晶闸管，所以控制线路比较简单，因而更加可靠。这种逆变器可以使用

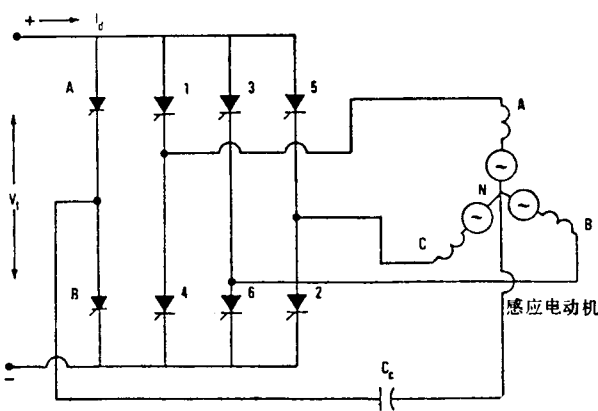


图 16 带第四臂换流的电流型逆变器

非快速的一般晶闸管和二极管，因而成本较低。电流型逆变器的一个非常重要的特点是它的能量反馈过程比较简单，并且不需要增加动力回路元件。在反馈状态下，电动机做为发电机工作，转差率是负值。此时逆变器的触发角（相对电机的端电压而言）是这样调整的，使电机输入电压 V_i 的极性反向。在同样的 I_d 方向下，整流电压 V_d 由于触发角的推后而反向，这样功率的传递方向就反过来了。

除了上述优点外，电流型逆变器拖动还存在一些局限性。逆变器的频率范围稍低，并且不能工作在空载状态下，它需要有最低负载电流，以满足逆变器可靠换流的要求。直流

侧电感和换流电容器的体积较大,使逆变器变得笨重且昂贵。换流依赖于电机次瞬变电感的存在,而后者使电机端承受很高的瞬变过电压。拖动系统的响应稍为缓慢,在轻载高速条件下会发生稳定问题。电流逆变器适用于中等和大容量的单机拖动情况。多电机运行还存在些困难,但近年来对这个问题的研究得到了相当的重视。

1.5 周波变换器拖动

周波变换器是一种将某一频率的交流功率直接变换成另一频率的交流功率的装置,其工作原理不同于带有直流环节的变换器。带直流中间环节的变换器首先将电源功率变换为直流,然后通过逆变器再变换为电压可变、频率可变的交流电源。这种直接变换技术早在本世纪三十年代首先出现在德国,当时用在电气化铁路上,将50Hz变换为 $16\frac{2}{3}$ Hz。

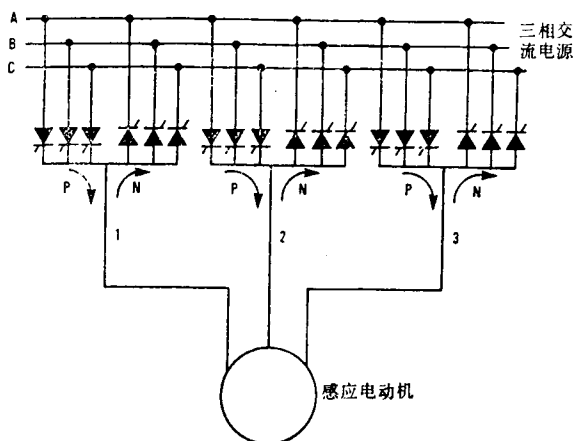


图 17 三相三波头周波变换器（示出的为无环流运行方式）

周波变换器可设计成电压可变、频率可变的电源装置,用以驱动交流电动机,其性能与前面1.2节所介绍的一样。周波变换器可用于感应电动机的定子回路,也可用于绕线或感应电动机的转子回路,后者就是所谓的静止Scherbius拖动(即串级调速系统),将在1.7节中详述。图17示出的是一个三相三波头的周波变换器拖动,用了18个晶闸管。图18给出了相电压和相电流波形。每相动力回路包括正极晶闸管组(P)和负极组(N),因此能通

过两个方向的电流。周波变换器是工作在无环流状态的,因为在正极组和负极组之间不允许环流存在。线路工作于相控自然换流方式。晶闸管的触发角是这样调整的,使变换器产生一个平均正弦电压,如图18所示。当锯齿一样的电压波形加在电机端时,产生一个滞后的近似正弦的电流。正向相电流在P组间分配,它有两种工作状态:整流和逆变。在整流状态下,触发角 α 在 0° 到 90° 间变化,有功功率流向负载。而在逆变状态下,触发角 α 在 90° 到 180° 间变化,无功功率回流向电源。负组的工作,除了在负半周内分配电流外,其余均同于前。周波变换器通常做为降频器使用的,其典型的输出频率限制在电源频率的 $1/3$ 和 $1/2$ 。

周波变换器的输出电压包含有合成谐波分量,其频率由下式给出: $k_1 n f_1 \pm k_2 n f_0$ 。式中 f_1 = 输入频率; f_0 = 输出频率; n = 波头数; k_1, k_2 为任意整数。电机电感对谐波的衰减作用

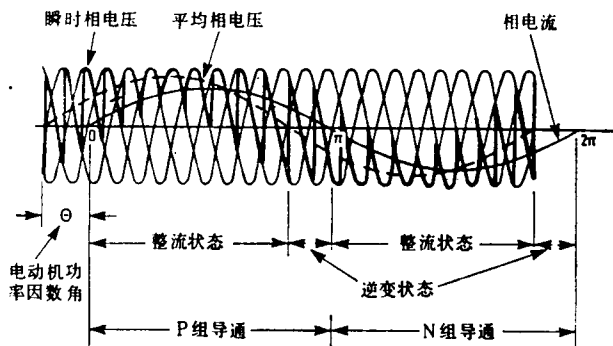


图 18 感应电动机在用周波变换器供电时的电压和电流波形