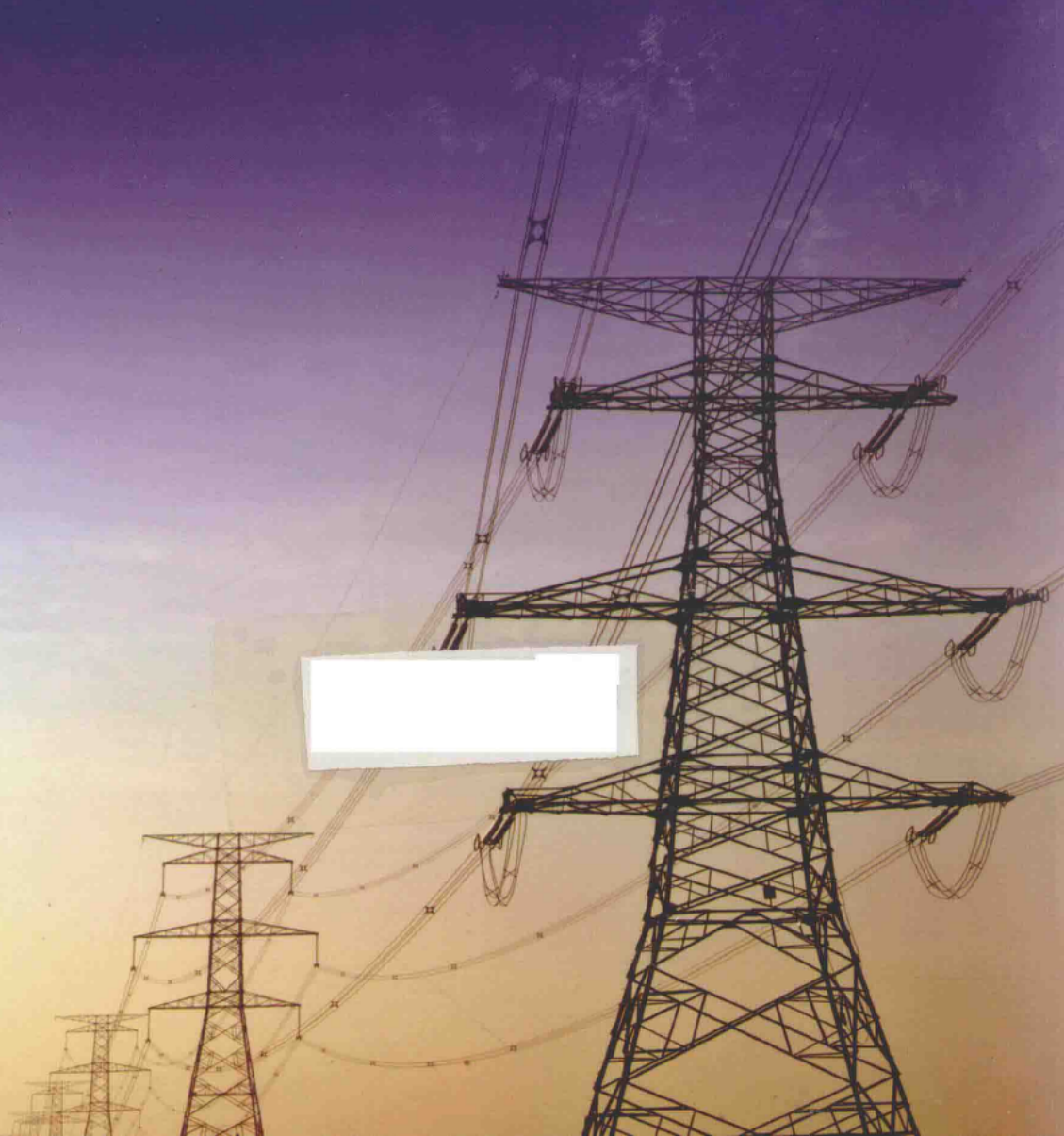


变频控制原理及应用

李遵基



变频控制原理及应用

李遵基

*

天津科学技术出版社出版、发行

河北供销印刷厂印刷

天津市张自忠路189号 邮编300020

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 2.5 字数 59 400

2004年8月第1版

2014年11月第2次印刷

印数：1-1000

ISBN 7-7308-2560-1

TP·120 定价：38.00 元

变频控制原理及应用

前 言

我国能源生产及消费已列入世界前列,但仍满足不了日益增长的工业生产和人民生活的需要。目前我国的能源利用效率较低,总效率只有30%左右。单位国民生产总值能耗比先进国家高出6~10倍,比印度高近1倍;单位产品的生产能耗比国外高出50%~100%;平均发电煤耗每千瓦小时比意大利、日本高80多克;吨钢能耗比日本高30%以上,因此节能潜力很大。节约能源是我国的一项基本国策,各工业企业将把降低能耗作为技术改造的重要内容,纳入计划,作为一次战略性任务对待。

当今世界上把电能转变成机械能基本上都是通过电动机来实现的。据美、日、法、俄等国的有关资料介绍,电动机所耗电能,占全部工业消耗电能的比重均超过60%。而我国几个主要电网中,电动机所耗电能的比重与工业发达国家的比重大致相当。这部分电机大都为直接拖动,每年造成了大量的能源浪费。我国现有各种风机、泵类约5000万台左右,总功率约为1.4亿千瓦,占工业用电30%以上。由于其负载工况变化较大,如采用变频调速技术实现变工况运行,则节能效果显著。以平均节电18%~20%计算,全国年节电可达500亿千瓦时,相当于增建一座600万千瓦的发电站,从而可节约几百亿元的电力建设投资、2000万吨发电用煤,减少50万吨二氧化硫和1200万吨二氧化碳的排放污染。

变频调速装置可以分为低压变频与高压变频两类。在火电厂中采用这种技术能使电动设备处于最佳运行状态,大大提高了其运行效率,不仅达到了节能的目的,同时也极大地提高了设备的自动化控制水平,具有重大的现实意义,其表现在以下几个方面。

(1)提高机组运行的安全可靠。电力生产是关系到国计民生的大事,它直接关系到工农业生产安全和居民正常用电,这种生产不同于其他生产领域,由于电力这种产品不能储存的固有特点,使得发电、输电和用电必须同步完成,短时间的停电会给国民经济造成无法估量的损失。随着大容量、高参数机组的普及,采用变频调速技术,可大大提高系统的自动化水平,减少人为误操作,这对发电厂安全生产水平的提高具有重要意义。

(2)提高机组运行的经济性。变频调速控制技术能显著地起到节能降耗的作用。同时,由于其提高了设备的自动化水平,保证了机组工作在良好的状态下,最大限度地提高了系统的效率,从而大大提高了发电企业的经济效益,这在竞价上网机制下显得格外重要。

(3)改善劳动条件。采用变频调速控制技术,可使运行人员从繁忙的体力劳动和沉重的精神压力中解放出来,同时也大大降低了噪音,改善了生产和劳动环境。

(4)减少运行人员,提高了劳动生产率。近些年来,我国已对变频调速技术进行了一定的研究,主要用于中、小型设备上,如给煤机、给粉机、中小型风机、水泵及其它领域等,并得到了广泛的推广和应用。近几年来,高压变频调技术得到了迅猛发展,其节能效果更为显著,目前正在推广应用之中。

目 录

第一章 电气传动调速的发展	(1)
1.1 调速方式的发展	(1)
1.2 传统交流异步电动机调速方式	(1)
第二章 变频器的原理	(6)
2.1 变频器的基本构成	(6)
2.2 交-直-交变频器的分类	(7)
2.3 变频器的输出电压调节方式	(11)
2.4 变频器中的整流器	(12)
2.5 变频器的逆变器及其 PWM 控制	(14)
第三章 变频器的应用及其控制特点	(17)
3.1 变频器的应用范围	(17)
3.2 变频控制的特点	(18)
3.3 低压变频控制应用实例	(19)
第四章 变频控制节能原理分析	(24)
4.1 阀门/挡板调节改变频调速的节能原理	(24)
4.2 传统流量控制方法与变频控制的能耗比较	(24)
第五章 高压变频器	(26)
5.1 高压变频器的分类	(26)
5.2 电流源型高压变频器	(26)
5.3 电压源型高压变频器	(29)
5.4 火电厂高压变频调速节能应用实例及效益分析	(33)
结束语	(34)
变频控制试题及答案	(35)

第一章 电气传动调速的发展

1.1 调速方式的发展

众所周知，直流调速系统具有较为优良的静、动态性能指标。在很长的一个历史时期内，调速传动领域基本上被直流电动机调速系统所垄断，直流电动机虽有调速性能好的优点，但也有一些固有的难于克服的缺点。主要是机械式换向器带来的弊端，其缺点主要有：①维修工作量大，事故率高；②容量、电压、电流和转速的上限值均受到换向条件的制约，在一些大容量、特大容量的调速领域中无法应用；③使用环境受限，特别是在易燃易爆场合难于应用。相反，交流电动机有一些固有的优点：①容量、电压、电流和转速的上限不象直流电动机那样受限制；②结构简单、造价低；③坚固耐用，事故率低，容易维护。其最大的缺点是调速相对较困难，简单调速方案的性能指标不佳。但随着交流电动机调速的理论问题的突破和调速装置（主要是变频器）性能的完善，交流电动机调速性能差的缺点已完全得到了克服。目前，在电气调速传动领域内，由直流电动机占统治地位的局面已受到猛烈冲击，从数百瓦级的家用电器直到数千千瓦级甚至数万千瓦级的传动装置，都可以用交流调速传动方式来实现。可以相信，在不久的将来，交流调速电气传动将会完全取代直流调速电气传动。

1.2 传统交流异步电动机调速方式

异步电动机定子三相对称绕组空间相隔 120° 角，当通过三相对称电流后，便产生了旋转磁场。其旋转场的转速（亦称同步转速）：

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (\text{r/min}) \quad (1)$$

式中， f_1 为定子绕组电源频率； p 为磁极对数

异步电动机的转差率：

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (2)$$

由此得异步电动机的转速：

$$n = n_1 (1 - s) = \frac{60f_1}{p} (1 - s) \quad (\text{r/min}) \quad (3)$$

由(3)式可知，异步电动机转速的调节方法可分为调转差率、调极对数和调电源频率三类，下面分别予以详细叙述。

1.2.1 改变转差率方法

该类方法又可分为调定子电压法、转子串电阻法、串级调速法、电磁转差离合器调速法及液力耦合器调速法。

(1) 调定子电压调速

异步电动机的最大转矩公式

$$T_{\text{MAX}} \approx \frac{m_1 P U_1^2}{4\pi f_1 (x_{1\sigma} + x_{20})} \quad (4)$$

式中： m_1 为定子绕组相数； p 为磁极对数； U_1 为定子绕组电源电压；

f_1 为定子绕组电频率； $x_{1\sigma}$ 为定子绕组漏抗； x_{20} 为转子不动时转子绕组折算到定子绕组上的漏抗。

由 (4) 式可知： $T_{MAX} \propto U_1^2$ 在不同定子电压时，同步转速 n_1 不变，临界转差率 s_m 也保持不变，而电动机的最大转矩成平方比例地下降。

如负载转矩 T_{fs} 具有风机转矩性质时，可以获得较低的稳定运行速度（见图 1 中的负载特性曲线 1）。如负载为恒转矩特性时（见图 1 中的负载特性曲线 2），当电压 U_1 单调减小时，其转速由 n_a 降到 n_c ，其调节范围相当窄，往往满足不了生产机械对调速的要求。

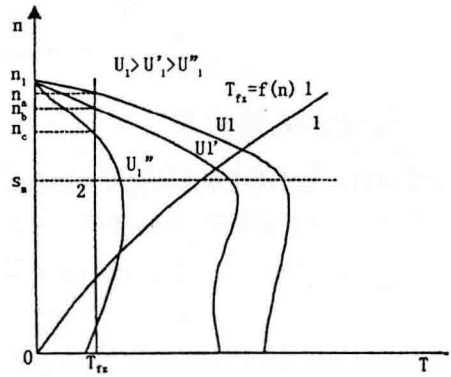


图 1 改变定子电源电压调速

(2) 转子串电阻调速

此法只适用于绕线转子异步电动机。异步电动机转子电流

$$I_2 \approx \frac{sE_2}{R_2} \quad (5)$$

式中： s 为转差率； R_2 为转子电阻折算到定子上的电阻；

E_2 为转子不动时转子绕组折算到定子绕组上的感应电势。

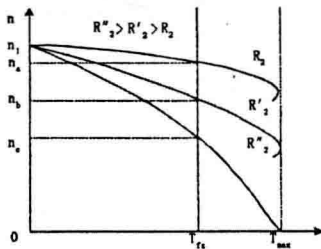


图 2 转子回路串电阻调速

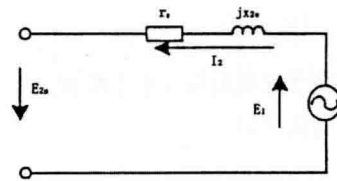


图 3 转子回路串电势等效电路

在负载转矩和定子电压不变的情况下， I_2 在调速前后近似保持不变，因此改变转子电阻，即 R_2' 变化，要维持 I_2 不变， s 将随之改变，即转速也随之改变，这就是转子串电阻调速的基本原理。从图 2 可见，在恒转矩负载下，增大调速电阻，电机转速随之降低，当调速电阻由 R_2 增加到 R_2'' 时，其转速由 n_a 降到 n_c 。可见，这种调速方法的调速范围也不大，而且，由于调速电阻的增加，其损耗必然增加，使电动机的效率较低，因此这种调速方法很不经济。

(3) 串级调速

这种调速方法是在转子回路中串入一个三相对称的附加电势 \dot{E}_f ，其频率与转子电势 \dot{E}_{2s} 频率相同，如图 3。当转子回路附加电势 \dot{E}_f 后，其转子电流

$$I_2 = \frac{\dot{E}_{2s} \pm \dot{E}_f}{R_2} = \frac{s\dot{E}_2 \pm \dot{E}_f}{R_2} \quad (6)$$

\dot{E}_f 与 \dot{E}_{2s} 同相位时取“+”号，反相位时取“-”号。由此可知，改变 \dot{E}_f 的大小和相位（相位改变指与 \dot{E}_{2s} 相位相同或相反）即可调节转子回路的电动势或电流的大小，从而达到改变转矩和转速的目的。

目前国内主要采用串入与 \dot{E}_{2s} 反相位的附加电势 \dot{E}_f 的方法，应用最广泛的调速系统原理图如图 4 所示。通过改变逆变器晶闸管触发角，即可改变逆变器两端电压，也就是改变了附加电动势 \dot{E}_f 的大小，从而实现调速目的，该系统称为“晶闸管串级调速系统”。这种串入反相位电动势的调速系统，当 \dot{E}_f 增加时，转速下降。当 $\dot{E}_f = 0$ 时，电动机转速最高，显然它低于同步速。所以这种情况下调 \dot{E}_f 的大小，电动机转速只能在同步速以下变化，调速范围小。该方法由于转子吸收的功率有一部分（即转差功率 sP_M ）可以回馈给电网，因此其效率较转子串电阻调速方法要高，但其设备费用较高，控制线路相对复杂。

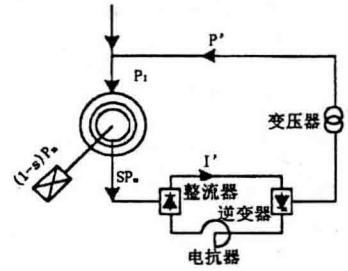


图 4 晶闸管串级调速系统

(4) 电磁转差离合器调速

该方法是在笼型异步电机和负载之间串接电磁耦合器，适用于调速性能要求不变的小容量传动控制中。发电厂的给煤、给粉调节以及其他许多地方都采用传统的滑差电机进行控制，即电磁转差离合器调速方式，其原理可用图 5 表示。

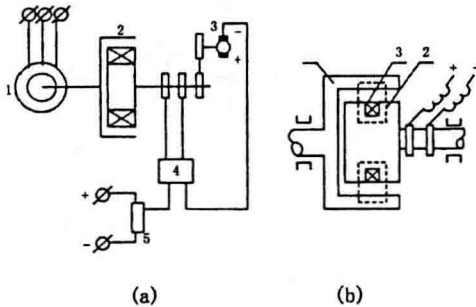


图 5 电磁转差离合器调速系统原理图

- (a) 带速度负反馈的电磁转差离合器调速系统原理图
 1—被调电动机 2—电磁转差离合器 3—测速发电机
 4—放大器 5—速度给定器
- (b) 电磁离合器工作原理图
 1—电枢 2—磁极 3—励磁绕组

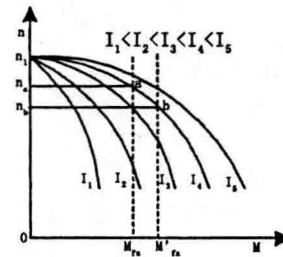


图 6 电磁转差离合器调速机械特性

电磁转差离合器由电枢和感应子两个部分组成。电枢为主动部分，转速恒定，感应子为从动部分。电枢与感应子间气隙为 0.5mm 左右。其调速功能是通过调节感应子励磁电流的大小，改变气隙磁感应强度 B ，从而改变感应子从动轴的电磁转矩 M 来实现的，其关系式为：

$$M = \frac{2B^2 L^2 R^2}{Z_p} P (\omega_1 - \omega_2) \quad (7)$$

式中， B 为气隙磁感应强度； L 为电枢的有效长度； R 为电枢平均半径；

Z_p 为一个磁极下漏流路径上的等效阻抗； P 为感应子磁极对数；

ω_1 为电枢旋转角速度； ω_2 为感应子旋转角速度。

电磁转差离合器调节励磁电流后的机械特性见图 6。由图可见，在某一恒定转矩 M 下，励磁电流发生变化时，转速从 n_b 变到 n_a ，调速范围很小，且非线性严重，励磁电流损失都转化为热耗。

(5) 液力耦合器调速

液力耦合器主要由泵轮、涡轮和旋转内套组成，如图 7 所示。它们形成了两个腔：在泵轮与涡轮与涡轮间的腔中有工作油所形成的循环流动圆；在涡轮与旋转内套的腔中，由泵轮和涡轮的间隙（也有在涡轮壳上开几个小孔的）流入的工作油，随旋转内套和涡轮旋转，在离心力的作用下，形成油环。工作油在泵轮里获得能量，而在涡轮里释放能量，如果改变工作油油量的多少，就可改变传递动力的大小，从而改变涡轮的转速，以适应负荷的需要。

泵轮的转轴即主动轴，是固定的高速轴。涡轮的转轴是从动轴，它由泵轮出口的工作油油压来冲动涡轮旋转，从而驱动直接（经联轴）连接在从动轴上的水泵转子。油非刚性，因此其传动效率一定小于 1；工作油在涡轮和泵轮里有环流，有环流就要产生磨擦和冲击等损失，且随着泵轮与涡轮的转速差大，工作油循环的流速大，损失也大，因此传动效率也愈低。涡轮与泵轮的转速比 $i = \frac{n'}{n}$ ，实际上反映了液力耦合器的传动效率 η ，即： $i = \frac{n'}{n} = \eta$ 。涡轮与泵轮的转差率 s （也有称滑移率），则反映了液力耦合器的传动损失 $(1 - \eta)$ ，即 $s = \frac{n - n'}{n} = 1 - \eta$ 。

液力耦合器工作油量 q 与涡轮转速 n 的关系见图 8。由图可见，当改变工作油量 q 时，涡轮转速变化不大，因此调速范围也不够宽广。

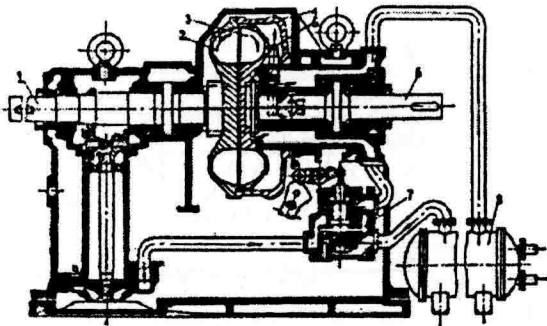


图 7 液力耦合器结构图

1—主动轴；2—泵轮；3—涡轮；4—旋转内套；5—勺管；
6—从动轴；7—进油调节阀；8—油冷却器；9—工作油泵

除传动效率低以外，这种调速方法还有如下缺点：

1) 受执行机构和液压机构限制，调速精度差，同时还存在严重非线性，只有在 15%~85% 之间是调节线性区，即使在这区间仍存在增速与减速之间逆差间隙，造成自动系统很难投入运行。

2) 运行不可靠，国内已有多起由于液力耦合器叶片破损，飞出机体造成事故的先例，其主要原因是耦合器制造精度跟不上。另外，采用该方法需要一整套油系统，维护工作量很大。

1. 2. 2 改变极对数方法

在频率不变的情况下，异步电机的同步速与极对数成反比，所以改变电机绕组的极对数，就能达到调速的目的。该方法可以是在一套定子绕组中，利用改变绕组的接法得到两种转速，也可通过在定子槽内嵌

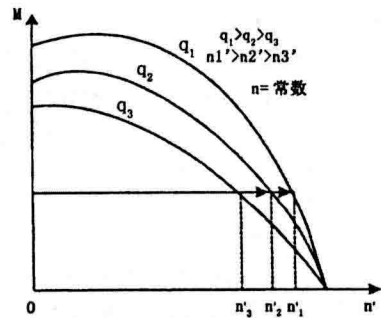
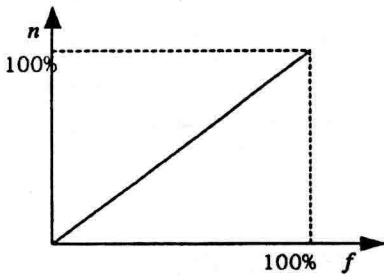


图 8 改变工作油量与涡轮转速 n 的关系

放两套不同极对数的独立绕组，而每套绕组又可以有不同的接线，从而做成三速或四速电机。但后者会使电机的体积增大，成本上升。变极电动机的转子一般都是笼形转子，因这种转子的极对数能自动随定子绕组极对数的改变而改变，使定子磁动势的极对数总相等，从而产生平均电磁转矩。而绕线转子异步电动机要实现这一要求非常困难，因此一般不用。该调速方法的最大缺点就是只能一级一级地改变转速，而不能实现平滑调速。

1. 2. 3 改变电源频率方法

前述各种调速方法不是能耗大，效率低，就是调速性能欠佳，如调速范围窄，调速精度不高，自动化程度低等。与它们相比，变频调速性能最为优良，节能降耗效果最明显，且自动化程度高、保护功能齐全，同时，性能价格比也很高。它利用电动机的同步速与频率成正比的特性，通过改变定子电源频率进行调速，具有平滑、宽广的调速范围（如图9所示）。



目前，用旋转机组作为可变频率电源对异步电动机进行调速的方式已不多用，而利用电力晶体管 GTR、门极可关断晶闸管 GTO 和绝缘栅双极晶体管 IGBT 等功率开关器件构成的静止变频电源进行调速的装置已被广泛采用。

该方法的优点是节能降耗和提升调速性能（详见下文分析）。

图9 变频调速中转速与频率关系

第二章 变频器的原理

在交流异步电动机的诸多调速方法中，变频调速的性能最佳，且使用方便，可靠性高，并且具有显著的经济效益，所以逐步得到推广。

2.1 变频器的基本构成

变频器根据电能变换方式的不同可分为交-交和交-直-交两种形式。交-交变频器可将工频交流电直接变换成频率、电压均可控制的交流电，又称“直接式变频器”。其工作原理见图 10。电路由 P 组和 N 组反并联的晶闸管变流电路构成，和直流电动机可逆调速用的四象限变流电路完全相同。变流器 P 和 N 都是相控整流电路，P 组工作时，负载电流 i_0 为正，N 组工作时， i_0 为负。让两组变流器按一定的频率交替工作，负载就得到该频率的交流电。改变两组变流器的切换频率，就可以改变输出交流电的频率，改变交流电路工作时的触发角 α ，就可以改变交流输出电压的幅值。

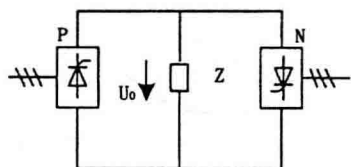


图 10 交-交变频电路基本原理

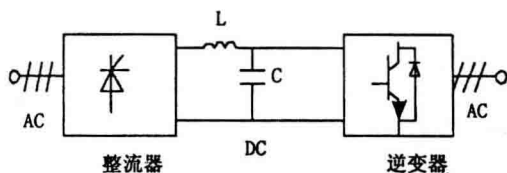


图 11 交-直-交变频器的基本原理

这种变频器的最高输出频率仅为电源频率的 $1/2$ 至 $1/3$ ，其缺点是不能高速运转。但由于其直接变换效率高，输出波形得到改善，因此已在中低速领域内，作为驱动中大容量异步电动机的调速方法而得到较为广泛的应用。

工程实际中应用最多的是交-直-交变频器（见图 11），它是先把工频交流电通过整流器变成直流电，然后再把直流电变换成频率、电压均可控制的交流电，它又称为“间接式变频器”。由于这种类型的变频器已被广泛使用，下文中我们主要介绍这种变频器。上述两种形式变频调速的主要特点见表 1。

表 1 交-交变频与交-直-交变频主要特点的比较

变频器类型 比较项目	交-交变频	交-直-交变频
换能形式	一次换能，效率较高	两次换能，效率略低
换流方式	电源电压换流	强迫换流或负载换流
装置元件数量	元件较多，元件利用率较低	元件较少，元件利用率较高
调频范围	最高频率为电源频率的 $1/3 \sim 1/2$	频率调节范围宽，不受电源频率限制
电网功率因数	较低	移相调压、低频低压时功率因数低，用斩波或 PWM 调压，则功率因数高

交-直-交变频器的基本构成如图 12 所示，由主电路（包括整流器、中间直流环节、逆变器）和控制电路组成，分述如下：

(1) 整流器。电网侧的交流器 I 是整流器，它的作用是把三相（也可以是单相）交流电整流成直流电。

(2) 逆变器。负载侧的变流器 II 为逆变器。最常见的结构形式是利用六个半导体主开关器件组成的三相桥式逆变电路。有规律地控制逆变器中主开关器件的通与断，可以得到任意频率的三相交流电输出。

(3) 中间直流环节。由于逆变器的负载为异步电动机，属于感性负载。无论电动机处于电动或发电制动状态，其功率因数总不会为 1。因此，在中间直流环节和电动机之间总会有无功功率的交换。这种无功能量要靠中间直流环节的储能元件（电容器或电抗器）来缓冲。所以又常称中间直流环节为中间直流储能环节。

(4) 控制电路。控制电路常由运算电路、检测电路、控制信号的输入、输出电路和驱动电路等构成。其主要任务是完成对逆变器的开关控制、对整流器的电压控制以及完成各种保护功能等。控制方法可以采用模拟控制或数字控制。高性能的变频器目前已经采用微型计算机进行全数字控制，利用尽可能简单的硬件电路，主要靠软件来完成各种功能。由于软件的灵活性，数字控制方式常可以完成模拟控制方式难以完成的功能。

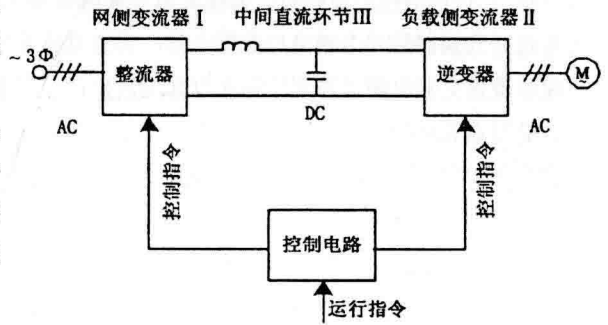


图 12 变频器的基本构成

2.2 交-直-交变频器的分类

这里主要按不同角度进行如下分类：

2.2.1 按中间直流环节的性质分类

当逆变器输出侧的负载为交流电动机时，在负载和中间直流环节之间将有无功功率的交换。用于缓冲无功功率的直流环节储能元件可以是电容或是电感。据此，变频器分成电压型变频器和电流型变频器两大类。

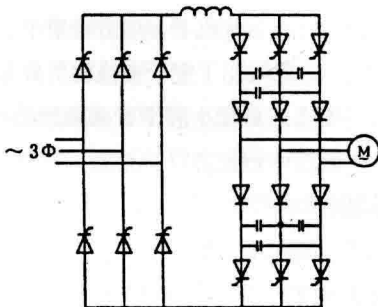


图 13 电流型变频器的主电路

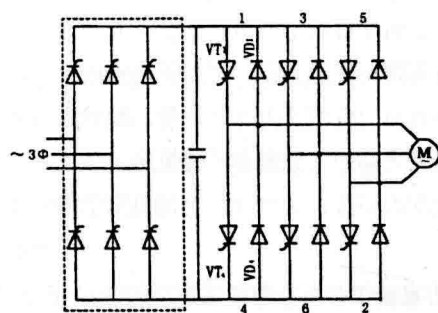


图 14 电压型变频器的主电路

(1) 电流型变频器

电流型变频器主电路的典型构成方式如图 13 所示。其特点是中间直流环节采用大电感作为储能环节，

无功功率将由该电感来缓冲。由于电感的作用，直流电源 I_d 趋于平稳，电动机的电流波形为方波或阶梯波，电压波形接近于正弦波。直流电源的内阻较大，近似于电流源，故称为“电流源型变频器”或“电流型变频器”。这种电流型变频器，其逆变器中晶闸管每周期内工作 120° ，属 120° 导电型。

电流型变频器的一个较突出的优点是：当电动机处于再生发电状态时，回馈到直流侧的再生电能可以方便地回馈到交流电网，不需要在主电路内附加任何设备，只要利用网侧的不可逆变流器改变其输出电压极性（控制角 $\alpha > 90^\circ$ ）即可。

这种变频器可用于频繁急加、减速的大容量电动机的传动。在大容量风机、泵类节能调速中也有应用。

(2) 电压型变频器

电压型变频器典型的一种主电路结构形式如图 14 所示，其中用于逆变器晶闸管的换相电路未画出。图中逆变器的每个导电臂，均由一个可控开关管和一个不控器件（二极管）反并联组成。晶闸管 $VT_1 \sim VT_6$ 称为主开关器件， $VD_1 \sim VD_6$ 称为回馈二极管。这种变频器大多数情况下采用 6 脉波运行方式，晶闸管在一周期内导通 180° ，属 180° 导电型。该电路的特点是，中间直流环节的储能元件采用大电容，负载的无功功率将由它来缓冲。由于大电容的作用，主电路直流电压 E_d 比较平稳。电动机端的电压为方波或阶梯波。直流电源内阻比较小，相当于电压源，故称为“电压源型变频器”或“电压型变频器”。

对负载电动机而言，电压型变频器是一个交流电压源，在不超过容量限度的情况下，可以驱动多台电动机并联运行，具有不选择负载的通用性。缺点是电动机处于再生发电状态时，回馈到直流侧的无功能量难以回馈给交流电网。要实现这部分能量向电网的回馈，必须采用可逆变流器。如图 15 所示，网侧变流器采用两套全控整流器反并联。电动时由桥 I 供电，回馈时由桥 II 作有源逆变运行（ $\alpha > 90^\circ$ ），将再生能量回馈给电网。

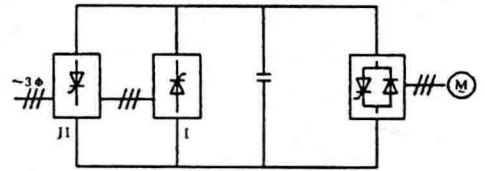


图 15 再生能量回馈型电压型变频器

2. 2. 2 按控制方式分类

(1) U/f 控制

对异步电动机进行调速控制时，为了在大范围内调速运转时电动机的效率、功率因数不致下降，希望电动机的主磁通保持额定值不变。磁通太弱，铁心利用不充分，同样的转子电流下，电磁转矩小，电动机的负载能力下降；磁通太强，则处于过励磁状态，使励磁电流过大，这就限制了定子电流的负载分量，为使电动机不过热，负载能力也要下降。异步电动机的气隙磁通（主磁通）是定、转子合成磁动势产生的，下面说明怎样才能使气隙磁通保持恒定。

由电机理论知道，三相异步电动机定子每相电动势的有效值为

$$E_1 = 4.44 f_1 N_1 \Phi_m$$

式中， E_1 为定子每相由气隙磁通感应的电动势的方均根值（V）； f_1 为定子频率（Hz）；

N_1 为定子相绕组有效匝数； Φ_m 为每极磁通量（Wb）

由上式可见， Φ_m 的值是由 E_1 和 f_1 共同决定的，对 E_1 和 f_1 进行适当的控制，就可以使气隙磁通保持额定值不变。下面分两种情况说明。

a) 基频以下的恒磁通变频调速。这是考虑从基频向下调速的情况。为了保持电动机的负载能力，应

保持气隙主磁通 Φ_m 不变，这就要求降低供电频率的同时降低感应电动势，保持 $E_1/f_1 = \text{常数}$ ，即保持电动势与频率之比为常数进行控制。这种控制又称为恒磁通变频调速，属于恒转矩调速方式。但是， E_1 难于直接检测和直接控制。当 E_1 和 f_1 的值较高时，定子的漏阻抗压降相对比较小，如忽略不计，则可以近似地保持定子相电压 U_1 和频率 f_1 的比值为常数，即认为 $U_1 = E_1$ ，保持 $U_1/f_1 = \text{常数}$ 即可。这就是恒压频比控制方式，是近似的恒磁通控制。当频率较低时， U_1 和 E_1 都变小，定子漏阻抗压降（主要是定子电阻压降）不能再忽略。这种情况下，可以人为地适当提高定子电压以补偿定子电阻压降的影响，使气隙磁通基本保持不变，从而使电动机具有恒定的 T_{\max} 。如图 16 所示，其中 1 为 $U_1/f_1 = C$ 时的电压、频率关系，2 为有电压补偿时的电压、频率关系。实际装置中 U_1 与 f_1 的函数关系并不简单的如曲线 2 所示。通用变频器中 U_1 与 f_1 之间的函数关系有很多种，可以根据负载性质和运行状态加以选择。

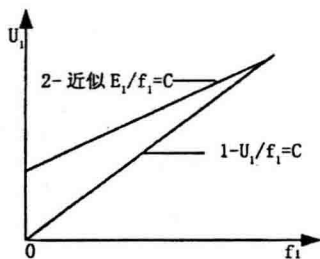


图 16 U_1/f_1 关系

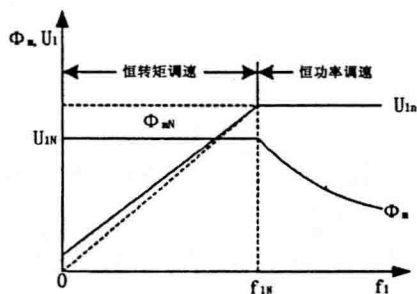


图 17 异步电动机变频调速时的控制特性

b) 基频以上的恒功率变频调速。这是考虑由基频开始向上调速的情况。实现恒功率调速方式，也要靠协调 E_1 与 f_1 之间的关系来保证。协调控制条件是 $E_1^2/f_1 = C$ 。由电机理论可知，异步电动机转子电流，电动机的电磁转矩 $T \propto (E_1/f_1)^2$ ，若保持 $E_1^2/f_1 = C$ ，则 $T \propto 1/f_1$ ，即 $Tf_1 = C$ ，则异步电动机的电磁功率 $P_M = T\Omega = C$ 是恒定的。因此在 $E_1^2/f_1 = C$ 条件下，可以实现恒功率调速方式。

保持 $E_1^2/f_1 = C$ 时，随着 f_1 的升高，在同样的转差频率 ω 下， T 将成反比地减小。当频率由额定值 f_{1N} 向上增大时，电压 U_1 受额定电压 U_{1N} 的限制不能再升高，只能保持 $U_1 = U_{1N}$ 不变，这可以称为恒压运行方式。恒压运行方式属于近似的恒功率运行方式，说明如下：

将 $U_1 = C$ 近似看成 $E_1 = C$ ，则 $T \propto 1/f_1^2$ 。在转差频率 ω 保持不变时，随着 f_1 的上升，电磁转矩将按 f_1 的二次方关系迅速减小，这是问题的一个方面。另一方面，当 $E_1 = C$ 时， $I_2 \propto E_1/f_1$ 。随着 f_1 的上升， T 与 I_2 的关系不再确定不变。当 f_1 上升时，在 ω 不变条件下，转子电流成反比地减小，若同时考虑到 f_1 上升、主磁通减小还要引起电动机励磁电流的减小，即 f_1 上升时电动机的定子电流在 ω 不变的条件下出现了一定的裕度。这就允许在运行中适当加大转差角频率 ω 。 ω 的增大，将使电磁转矩加大。可以脱离 $T \propto 1/f_1^2$ 的关系，而向 $T \propto 1/f_1$ 的方向靠拢。基于上述原因，人们认为恒压运行方式是近似的恒功率方式。一般所说的恒功率调速是指恒压方式，而不是指 $E_1^2/f_1 = C$ 。

综合上述两种情况，异步电动机变频调速的基本控制方式如图 17 所示。在基频以下属于“恒转矩调速”，而在基频以上，基本上属于“恒功率调速”。

U/f 控制方式的简化原理框图如图 18 所示，采用 PWM 方式进行控制。逆变器的控制脉冲频率发生器同时受于频率指令 f^* 和电压指令 U ，而 f^* 与 U 之间的关系是由 U/f 曲线发生器决定的。这样经 PWM 控制之后，变频器的输出频率 f 和输出电压 U 之间的关系，就是 U/f 曲线发生器所确定的关系。由图可

见，转速的改变是靠改变频率的设定值 f^* 来实现的。电动机的实际转速要根据负载的大小，即转差率的大小来决定。负载变化时，在 f 不变条件下，转子转速将随负载转矩变化而变化，故它常用于速度精度要求不十分严格或负载变动较小的场合。

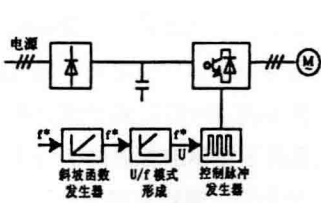
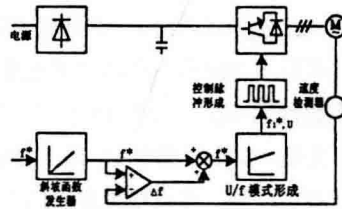
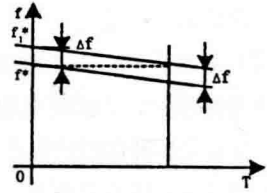


图 18 U/f 控制方式



(a) 电路结构



(b) 机械特性

图 19 转差频率控制方式

U/f 控制是转速开环控制，无需速度传感器，控制电路简单，负载可以是通用标准异步电动机，所以通用性强，经济性好，是目前通用变频器产品中使用较多的一种控制方式。

(2) 转差频率控制

在没有任何附加措施的情况下，U/f 控制方式下，如果负载变化，转速也会随之变化，转速的变化量与转差率成正比。U/f 控制的静态调速精度显然较差，为提高调速精度，采用转差频率控制方式。

根据速度传感器的检测，可以求出转差频率 Δf ，再把它与速度设定值 f^* 相叠加，以该叠加值作为逆变器的频率设定值 f_1^* ，就实现了转差补偿。这种实现转差补偿的闭环控制方式称为转差频率控制方式。与 U/f 控制方式相比，其调速精度大为提高。但是，使用速度传感器求取转差频率，要针对具体电动机的机械特性调速控制参数，因而这种控制方式的通用性较差。

转差频率控制方式的原理框图如图 19 (a) 所示。对应于转速的频率设定值为 f^* ，经转差补偿后定子频率的实际设定值则为 $f_1^* = f^* + \Delta f$ 。由图 19 (b) 可见，由于转差补偿的作用，调速精度提高了。

(3) 矢量控制

上述的 U/f 控制方式和转差频率控制方式的控制思想都建立在异步电动机的静态数学模型上。因此，动态性能指标都不高。对于轧钢、造纸设备等对动态性能要求较高的应用，可以采用矢量控制变频器。

采用矢量控制方式的目的是，主要是为了提高变频调速的动态性能。根据交流电动机的动态数学模型，利用坐标变换的手段，将交流电动机的定子电流分解成磁场分量电流和转矩分量电流，并分别加以控制，即模仿自然解耦的直流电动机的控制方式，对电动机的磁场和转矩分别进行控制，以获得类似于直流调速系统的动态性能。在矢量控制方式中，磁场电流 i_{m1} 和转矩电流 i_{t1} 可以根据可测定的电动机定子电压、电流的实际值经计算求得。磁场电流和转矩电流再与相应的设定值相比较并根据需要进行必要的校正。高性能速度调节器的输出信号可以作为转矩电流的设定值，动态频率前馈控制 df/dt 可以保证快速动态响应。这种控制方法与标量控制的主要区别在于它不仅能控制电流的大小，且能控制电流的相位。但该方式的应用前提是需要对电机参数进行估算，如何提高参数的准确性一直是研究的课题。

矢量控制可分为有速度传感器和无速度传感器的矢量控制两种。有速度传感器的矢量控制变频器驱动电机时，一般适用于单机传动和较低转速时有较高的动态特性和较高的转速控制精度的场合，如轧钢机传动控制、货物运输控制、升降机控制和位置控制等。

无速度传感器的矢量控制变频器的控制模式是在有速度传感器矢量控制模式上的基础上，去掉转速检测环节，通过计算来估测电动机速度的反馈值，一般应用于单机传动、调速范围要求不高且低速转矩要求不高的场合，如风机、泵类和移动装置。虽然控制精度、系统动态性能和带速度闭环的矢量控制相比有所下降，但变频系统简单、操作方便、价格便宜。

上述三种控制方式的特性比较见表2。

表2 各种控制方式的特性比较

		U/f 控制	转差频率控制	矢量控制
加减速特性		急加减速控制有限度，4象限运转时在零速度附近有空载时间，过电流抑制能力小。	急加减速控制有限度（比U/f控制有提高），4象限运转时通常在零速度附近有空载时间，过电流抑制能力中。	急加减速时的控制无限度，可以进行连续4象限运动，过电流抑制能力大
速度控制	范围	1: 10	1: 20	1: 100
	响应	-	5 - 10rad/s	30 - 100rad/s
	定常精度	根据负载条件转差频率发生变动	与速度检出精度、控制运算精度有关	模拟量大值的0.5% 数字最大值的0.05%
转矩控制		原理上不可能	除车辆调速等外，一般不适用	可以控制静止转矩
通用性		基本上不需要因电动机特性差异进行调整	需要根据时机特性给定转差频率	按电动机不同的特性需要给定磁场电流，转矩电流、转差频率等多个控制量。
控制构成		最简单	较简单	稍复杂

另一种新的控制方法——直接转矩控制。它通过实时检测磁通幅值和转矩值，分别与它们的给定值比较，由磁通和转矩调节器直接输出所需的电压矢量值。直接转矩控制系统由速度控制环和转矩控制环组成。它在一定程度上解决了矢量控制中计算复杂，特性易受电动机参数影响的一些重大问题。

2.3 变频器的输出电压调节方式

变频调速时，需要同时调节逆变器的输出电压和频率，以保证电动机主磁通的恒定。对输出电压的调节主要有两种方式 PAM 方式和 PWM 方式。

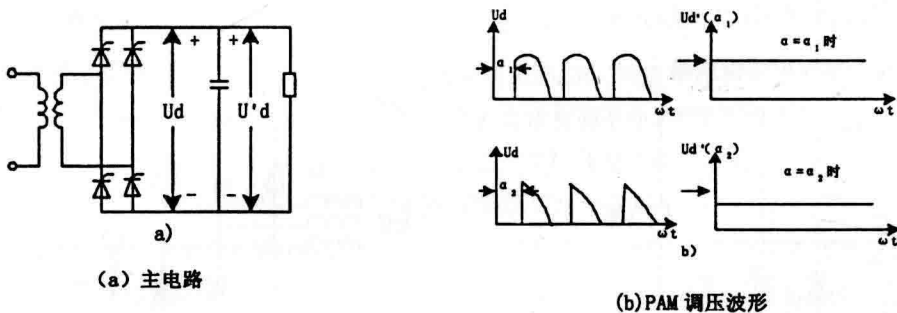


图20 单相桥式整流电路及其PAM调压原理示意图

(1) PAM方式。脉冲幅值调节方式，调压功能由整流侧完成，简称 PAM 方式。在变频器中，逆变器只负责调节输出频率，而输出电压的调节则通过控制相控制整流器的触发角大小（见图 20）或直流斩波器开关的通断时间（见图 21）来调节直流电压 E_d 去实现。如图 20，调节晶闸管触发角 α 的大小，令 $\alpha_2 > \alpha_1$ ，则 $U_d'(\alpha_2) < U_d'(\alpha_1)$ 。

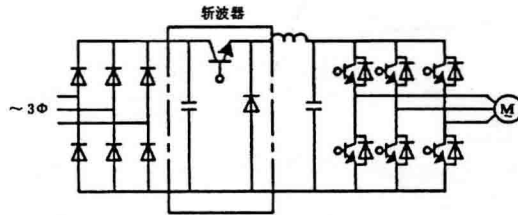


图 21 采用直流斩波器的 PAM 方式

采用相控整流器调压时，网侧的功率因数随调节深度的增加而变低；而采用直流斩波器调压时，网侧功率因数在不考虑谐波影响时，可以达到 $\cos\phi_1 \approx 1$ 。

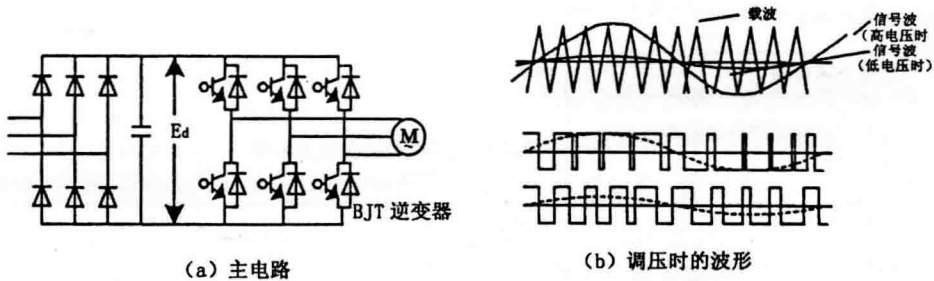


图 22 PWM 变频器

(2) PWM 方式。脉冲宽度调制方式，调压功能由逆变侧完成，简称 PWM 方式。最常见的主电路如图 22 所示。变频器中的整流器采用不可控的二极管整流电路。变频器的输出频率和输出电压的调节均由逆变器按 PWM 方式来完成。调压原理的示意如图 22 中 (b) 所示。利用参考电压波 U_R 与载频三角波 U_c 互相比来决定主开关器件的导通时间而实现调压。利用脉冲宽度的改变来得到幅值不同的正弦基波电压。这种参考信号为正弦波、输出电压平均值近似为正弦波的 PWM 方式，称为正弦 PWM 调制，简称 SPWM 方式。通用变频器中，采用 SPWM 方式调压，是一种最常采用的方案。

2. 4 变频器中的整流器

2. 4. 1 晶闸管相控桥式整流器

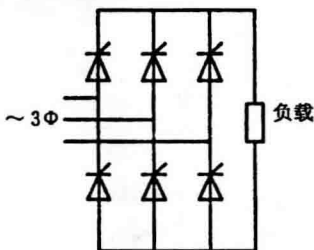


图 23 晶闸管相控桥式整流器

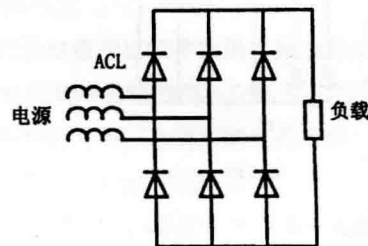


图 24 二极管桥式整流器

如图 23 所示, 采用这种整流方案的变频器中, 通过调整整流桥中晶闸管触发导通角 α 的大小, 即可实现输出电压的调节, 这种调压方式属于 PAM 方式。变频器中的逆变器只负责调节输出频率, 采用相控整流器调压时, 网侧的功率因数随调节深度的增加而降低, 且需要一套较为复杂的控制电路。因而在通用变频器中较少采用。

2. 4. 2 二极管桥式整流器

通用变频器中采用如图 24 所示的二极管不可控桥式整流电路方案的占绝大多数。逆变器采用 PWM 方案的情况下, 这是一种较好的方案。与晶闸管整流器相比, 这种方案在全速范围内网侧功率因数比较高。由于不必设置相应的控制电路, 所以控制简单成本比较低。下面就二极管桥式整流电路应用于变频器的一些技术问题进行分析。

从理论上讲, 该方案的网侧功率因数应接近于 1。但实际上, 由于中间直流回路采用大电容作为滤波器时, 整流器的输入电流实际上是电容器的充电电流, 呈较陡峭的脉冲波, 其谐波分量较大。受其影响, 虽然其基波功率因数 $\cos\phi_{\text{基}}$ 接近于 1, 但总功率因数却不可能是 1。尽管如此, 从总体上看这种方案控制简单, 成本较低, 网侧总的功率因数较高, 具有较大优势。至于上述问题的解决, 可以通过在逆变器的直流回路中接入直流电抗器或在交流输入端串联电抗器的办法予以解决。从实践上看, 效果令人满意, 成本也不高。

2. 4. 3 斩控式整流器 (PWM 整流器)

二极管整流器不能实现功率的双向传递, 为实现变频器的再生能量向电网的反馈, 网侧变频器应改成可逆变频器。传统的方式采用晶闸可逆变频器如图 25 所示。电动运行状态下, 由正桥 I 向负载提供功率; 再制动状态下, 由反并联的桥 II 作有源逆变运行 ($\alpha > 90^\circ$), 将功率返回电网。这种相控方式控制技术成熟, 但也有缺点, 如深控时功率因数低, 谐波含量高, 换相重叠引起电网电压波形畸变等。

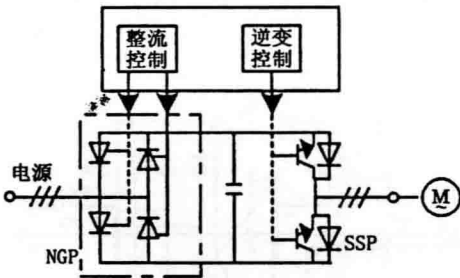


图 25 采用晶闸管的再生能量回馈式变频器

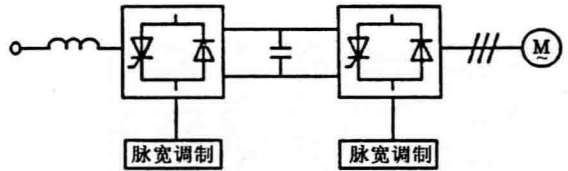


图 26 斩控式整流器应用原理框图

斩控式整流器 (又称 PWM 整流器) 的一个应用实例见图 26。其主电路结构与逆变器完全相同, 采用 PWM 控制方式。它即可作为整流器工作, 又可作为有源逆变器工作。由于采用了自关断器件, 通过恰当的 PWM 模式, 对网侧交流电流的大小和相位进行控制, 可以使交流输入电流接近正弦波并与电源电压同相位, 系统的功率因数总是接近于 1。当电动机减速制动从逆变器返回的再生功率使直流电压升高时, 又可以使交流输入电流的相位与电源电压相位相反, 以实现再生运行并将再生功率回馈到交流电网中去, 系统仍能保持直流电压在给定值上。这种情况下, 斩控整流器工作在有源逆变状态, 这种方案实现了变频器的高性能化, 因为采用了 PWM 整流器, 使得输入电流正弦化, 并且功率因数接近于 1。如果逆变器采用矢量控制的 PWM 方案, 输出电流为正弦, 并且动态性能好, 若控制得当, 这种双 PWM 变频系统的静、动态指标将高于晶闸管一直流电动机传动系统。