

交流电机的变频调速

臧英杰 吴守箴 编著

JIAOLIUDIANJI DE BIANPINTIAOSU

中国铁道出版社

内 容 提 要

本书专门讨论交流电机的变频调速。第一章介绍基本原理、电力变换装置及其分类、性能与应用；第二章介绍矩阵代数和坐标变换原理；第三章导出交流电机电压矩阵方程和电磁转矩的一般表达式；第四章和第五章分别分析电压型逆变器供电和电流型逆变器供电的鼠笼式异步电机变频调速系统的稳态特性和稳定性；第六章讨论了谐波电流、谐波损耗、谐波转矩以及逆变器供电对鼠笼式异步电机参数选择的影响；第七章讨论其他交流电机的变频调速。

交 流 电 机 的 变 频 调 速

臧英杰 吴守箴 编著

中国铁道出版社出版

责任编辑 张贵珍 封面设计 翟 达

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张：14.25 字数：354 千

1984年8月第1版 1984年8月第1次印刷

印数：0001—8,700册 定价：2.05元

全
三
册

序

近年来,在电力传动领域里已经发展了多种由晶闸管电力变换装置控制的交流电机调速传动方式,并在国民经济和国防事业的许多部门得到广泛的应用。其中,变频调速是交流电机各种调速传动方式中比较理想、比较合理的一种,它已成为当前电力传动系统发展的重要方向。

本书专门讨论交流电机的变频调速。第一章介绍交流电机变频调速的基本原理,叙述用于变频调速系统的电力变换装置以及各种交流电机变频调速系统的分类、性能与应用。由于本书使用电机轴系坐标变换和矩阵分析方法作为数学工具,并且在用数字计算机计算系统的特性时直接使用电压复数矩阵方程,因此,作为全书的基础。第二章介绍阵矩阵代数和坐标变换原理,给出复数矩阵运算的若干电算程序。第三章导出交流电机电压矩阵方程和电磁转矩一般表达式。第四章和第五章分别分析由电压型逆变器供电和电流型逆变器供电的鼠笼式异步电机变频调速系统的稳态特性和稳定性。由稳态特性基本关系式得出交流电机变频调速的控制方法、系统的组成以及运行方式与稳态运行特性。上述分析中,只考虑了逆变器输出函数中的基波分量,对于讨论稳态运行特性和稳态运行时的稳定性这是允许的。然而,逆变器输出函数中的高次谐波毕竟会给交流电机带来一些影响,因此,第六章讨论谐波电流、谐波损耗、谐波转矩以及逆变器供电对鼠笼式异步电机参数选择的影响。第七章讨论其他交流电机的变频调速,而稳极式同步电机和磁阻式电动机的变频调速则是凸极式同步电机变频调速的特例。书中以10kW异步电机变频调速系统为例对不同控制方法时的各种稳态运行特性进行了计算,用劳斯——古尔维茨判据对系统的稳定性进行判定,对所得结果进行了分析。

在考虑本书的内容时,得到西南交通大学杜庆莹教授的热情指导,特此致谢。本书原稿经上海铁道学院王祖泽教授审阅并提出许多宝贵意见,在此表示衷心地感谢。在编写过程中还得到上海铁路局科学技术研究所陈佳富工程师、上海铁道学院电力传动实验室张宗桐同志的许多帮助,也一并表示感谢。

由于作者学识浅薄、水平有限,肯定有许多重要的内容在本书中未能得到反映,书中还可能存在不少缺点和错误,欢迎读者批评、指正。

作 者

1983.6. 于上海

目 录

第一章 概 论	1
第一节 交流电机变频调速的基本原理	3
第二节 交流电机变频调速系统的电力变换装置	7
第三节 交流电机变频调速方式的分类、性能与应用	22
第二章 矩阵代数及其在交流电机分析中的应用	26
第一节 矩阵代数	26
第二节 矩阵在交流电机分析中的应用	47
第三节 电机轴系的坐标变换	50
第三章 交流电机的电压矩阵方程和转矩表达式	65
第一节 对称异步电机的电压矩阵方程	65
第二节 列出静止轴系电压矩阵方程的一般方法	75
第三节 对称多相凸极式同步电动机的电压矩阵方程	78
第四节 电磁转矩的一般表达式	80
第四章 电压型逆变器——异步电机变频调速	82
第一节 稳态特性基本公式	82
第二节 控制方法、运行方式与稳态运行特性	95
第三节 稳态运行特性的计算	127
第四节 稳定性分析	139
第五章 电流型逆变器——异步电机变频调速	152
第一节 稳态特性基本公式	152
第二节 控制方法、运行方式与稳态运行特性	157
第三节 稳态运行特性的计算	170
第四节 稳定性分析	176
第六章 异步电机变频调速系统中的谐波及其影响	183
第一节 谐波分量对异步电机稳态运行性能的影响	183
第二节 低频下转矩的脉动	197
第三节 变频调速系统中三相鼠笼式异步电机的参数特点	199
第七章 其他交流电动机的变频调速	205
第一节 同步电动机的变频调速	205
第二节 线绕式感应电动机的变频调速——双馈感应电机	213

第一章 概 论

在工业、农业、交通运输业和国防事业的许多部门中，要求许多电力传动系统能够进行精确、灵活而连续的速度控制，并能稳定的运行。为了满足这些要求，以往一直主要使用直流电动机。调节直流电动机的电枢端电压或励磁电流就可方便地获得调速特性。但是，在电力调速传动系统中使用交流电动机具有更大的吸引力，这是因为交流电动机与直流电动机相比具有一系列显著的优点：

1. 交流电机不存在换向器圆周速度的限制，也不存在电枢元件中电抗电势数值的限制，其转速可以设计得比相同功率直流电机的转速更高，因而单位功率重量指标较低。例如，直流电机的单位功率重量指标一般均在 5 kg/kW 以上，而鼠笼式异步电动机的仅在 $(4 \sim 1.5) \text{ kg/kW}$ 之间。

2. 交流电机的电枢电压和电流的数值都不受换向器的限制，因而，其单机功率可比直流电机的单机功率更大。

由于以上两点，在要求增大电机单机功率、减轻重量并且安装地位受到严格限制的场合（例如用作机车牵引电动机时），使用交流电机更为合适。

3. 由于交流电机的结构简单，没有换向器那种复杂、精密、耗费制造工时的部件，又由于单位功率重量指标较低，因而其制造成本低廉。

4. 直流电机在高速范围运行时，由于电抗电势数值的限制，一般不能发挥其额定功率，既便是有补偿绕组的直流电动机，就是在最高转速时的输出功率也仅能达到额定功率的 80% ，对无补偿绕组的电机就更低。而交流电动机没有这种限制，高速时仍可发挥较大的功率，甚至能以额定功率作恒功率运行。

5. 交流电机没有换向器之类需要经常保养、维修的部件，在安装地位受到限制、不易接近的场合也能使用。在环境恶劣的条件下，在不允许有火花的场合下也能可靠地工作。维修费用低廉。

虽然交流电机与直流电机相比具有以上许多优点，可是，由于交流电机的调速一直比较困难，所以，长期以来，交流电机只能作恒速运行，而在要求精确、灵活、连续调速的传动系统中，直流电机调速传动一直占主要地位。然而，近年来，一方面随着晶闸管整流和变频技术的迅速发展，用交流电机的调速传动系统代替直流电机调速传动系统已成为可能；另一方面，从节能的观点要求把原来作恒速运行的交流电机传动系统改为调速传动。因而，在电力传动领域里正在日益重视发展交流电机的调速传动。

自从能源问题引起世界各国的普遍注意以来，在电力传动系统中如何节能自然也成为重要的课题。发展高效率的电动机是节能的一个方面，对经常处于额定负载附近工作的电动机，其节能效果是很好的。但在很多情况下，电动机所拖动的负载是变化的，因此电动机可能有相当一部分时间处于轻负载运行工况，此时电动机效率降低，造成能源浪费。如果电动机能按输出负载的最佳转速运行，则所提高效率比高效率电动机的效果更大。这类负载最典型的例子是风机和泵类。拖动风机和泵类的电动机以往一直使用以恒速运行的交流电

机。由流体力学可知,风量(流量)与电机转速的一次方成正比,压力与转速的二次方成正比,风量(流量)与压力之积为负载功率。因此拖动风机和泵类的交流电机的功率与转速的立方成正比。可是过去调节风机的风量和泵类的流量是靠调节风门或阀门来实现的,而电动机却始终全速运行。这样,当流量减少时,电动机的功率却没能降下来,一部分能量损耗在风门或阀门上。若用可调速的交流电动机,使电机的转速随着所要求风量(流量)的减小而减小,则交流电动机能耗将大幅度下降,从而可节约大量电能,根据分析,一般可节约20~50%。据统计,驱动风机和泵类的交流电动机所耗电能大约占工业总耗电量的1/2,因此将原来一向采用交流电机恒速传动的风机、泵类传动系统改为交流电机调速传动,其节能效果较为显著。

由于上述原因,近年来已发展了多种由晶闸管控制的交流电动机调速传动方式并得到了广泛的应用。例如,使用晶闸管交流调压电路的异步电动机定子调压调速;使用晶闸管电路控制转子电阻平均值的线绕式异步电动机调阻调速;将线绕式异步电机的转差功率用晶闸管电路反馈到电网去的串级调速以及使用晶闸管变频装置的变频调速等。表1—1是交流电机的各种调速方式比较表,表中没有包括使用减速箱的齿轮减速、摆线针轮减速以及使用调速型液力耦合器的液力耦合调速方式。由表1—1可知,变频调速是比较合理和理想的一种调速方式,在交流电动机的各种调速传动方式中,它占有重要的地位,已成为研究和发展的主流,这正是本书所要讨论的主题。

交流电机各种调速方式的比较

表1—1

交流电动机种类与调速方式				调 速 设 备	调 速 比	调速性能	效率	适于何 种负载
异步电机 $n = \frac{60f_s}{n_p} (1 - s)$	调级对 数 n_p	鼠 笼 式 电 机	变换极对数	变极鼠笼式电机; 极数 变换器	2:1~4:1	不平滑调 速	高	恒转矩恒 功率
			调定子电压	定子外接电抗器; 电磁 调压器; 晶闸管交流调 压器	1.5:1~10:1	不平滑或 平滑调速	低	恒转矩
			转差离合器调速	电磁转差离合器	3:1~10:1	平滑调速	低	恒转矩
	调 转 差 率	线 绕 式 电 机	调转子电阻	多级或平滑变阻器; 晶 闸管直流开关	2:1	不平滑或 平滑调速	低	恒转矩
			机械式串级调速	转差功率经整流器供电 给直流电动机——交流 发电机组再反馈电网	2:1	平滑调速	较高	恒转矩
			电气串级调速	转差功率经硅整流器 ——逆变器向电网反馈	2:1~4:1	平滑调速	较高	恒转矩
	调定子频 率 f_s 或转子 频率 f_r	鼠笼式	调定子频率同时控制 定子电压或转差频率	循环变频器或整流器与 逆变器	2:1~10:1	平滑调速	高	恒转矩恒 功率
		线绕式	调转子频率同时协调 地控制转子电压	循环变频器或整流器与 逆变器	4:1~20:1 可超同步速	平滑调速	高	恒转矩恒 功率
同 步 电 机	同步电动机, 磁阻 式电机 $n = \frac{60f_s}{n_p}$	调定 子频 率 f_s	定子频率与定子电压协调 控制	循环变频器或整流器与 逆变器	2:1~10:1	平滑调速	高	恒转矩
	无换向器电机	调电 枢压 力 U	同步电动机自控式变频调 速	位置检测器; 分配器; 循环变频器或逆变器	0~满速	平滑调速	高	恒转矩

第一节 交流电机变频调速的基本原理

本书涉及的交流电机是无换向器式交流电机，即异步电机和同步电机。异步电动机又分为鼠笼式和线绕式。同步电机包括励磁的或永磁的凸极式同步电动机以及磁阻电动机（反应式同步电动机）。作为一种动力机械，电动机的最主要特性是它的转矩——转速特性。交流电机的变频调速就是用改变供电频率的方法来调节电动机的转速并且满足一定的转矩要求。每一种交流电机的变频调速原理和特性，在以后各有关章节将详细讨论，本节先以鼠笼式异步电动机和凸极式同步电动机为例，概述变频调速的基本原理以及有关的问题。

一、异步电机变频调速的基本原理

由电机学已知，异步电动机的转速为

$$n = \frac{60f_s}{n_p}(1-s) \quad (\text{r/min}) \quad (1-1)$$

式中 f_s ——电机定子频率 (Hz)；

n_p ——电机定子绕组极对数；

s ——转差率

$$s = \frac{f_{sl}}{f_s} = \frac{f_s - f_r}{f_s} = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1-2)$$

其中 f_r ——转子旋转频率 (Hz)，

$$f_r = \frac{n_p \cdot n}{60} \quad (1-3)$$

f_{sl} ——转差频率 (Hz)；

n_s ——同步转速 (r/min)。

在变频调速时，如果使 f_{sl} 与 f_s 成线性变化，即保持 s 不变，则转速 n 与定子频率 f_s 成线性变化。但有时需要使 f_{sl} 保持为常数或者使 f_{sl} 随 f_s 按某一非线性函数关系变化，这时转差率 s 就不是常数，转速 n 与定子频率 f_s 也就不是严格地成正比变化。然而，对于许多实际应用来说， s 的变化范围不大。如将 s 的变化忽略不计，则可以认为，调节定子频率 f_s 时，异步电动机的转速 n 即随之成正比变化。

异步电动机的电磁转矩为

$$T = K_T \Phi_M I_r \cos \varphi_r \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (1-4)$$

式中 K_T ——转矩常数

$$K_T = \frac{mn_p}{\sqrt{2}} W K_w$$

其中 m ——定子绕组相数，

W ——定子绕组每相匝数，

K_w ——绕组系数；

Φ_M ——每极气隙磁通 (Wb)；

I_r ——折算到定子侧的转子每相电流 (A)；

由于

$$\dot{I}_r = \frac{\dot{E}_r}{\frac{R_r}{s} + jx_{r\sigma}} \quad (1-5)$$

故

$$I_r = \frac{E_r}{\left[\left(\frac{R_r}{s} \right)^2 + (x_{r\sigma})^2 \right]^{1/2}} \quad (1-6)$$

其中 E_r ——折算到定子侧的转子每相电势 (V),

R_r ——折算到定子侧的转子每相电阻 (Ω),

$x_{r\sigma}$ ——折算到定子侧的转子每相漏抗 (Ω);

$$\cos \varphi_r = \frac{R_r}{s} / \left[\left(\frac{R_r}{s} \right)^2 + (x_{r\sigma})^2 \right]^{1/2} \quad (1-7)$$

$\cos \varphi_r$ ——转子电路的功率因数。

异步电动机是一种铁磁机构。对于任何铁磁机构,为了使铁心材料得到充分利用,运用时都要尽可能使它的磁通保持为额定磁通。因此,异步电动机在变频调速时,为了得到所需要的电磁转矩并使它本身的铁磁材料得到充分利用,应尽可能使气隙磁通恒定为额定磁通。要使磁通恒定,在调节定子频率时必须同时改变定子的端电压。即当增大定子频率时必须同时使定子电压成比例地增加,否则气隙磁通降低;当降低定子频率时,必须同时使定子电压成比例地降低,否则将超过饱和磁密而导致励磁电流过大,使损耗增加。

图 1-1 中曲线 I 表示定子频率 $f_s = K_1$ 时异步电机的转矩——转速特性。转差率 $s = 0$ 时,转矩 $T = 0$; 在小转差率范围,转差率增大时转子电流增大,因而转矩随转差率的增大而近似线性地增大。但当转差率增大到一定数值以后,一方面转子电流 I_r 的增大有使转矩增加的趋势,另外一方面,转差率增大使漏抗 $x_{r\sigma}$ 明显增大、 $\cos \varphi_r$ 减小,倾向于使转矩减小。因而,异步电动机的转矩——转速特性有一个最大值。最大转矩称为颠覆转矩 T_m , 因为,如果电动机的负载超过此值,转速即迅速地下降直至停机。相应于颠覆转矩 T_m 的转子旋转频率称为颠覆频率,相应的转差频率则称为颠覆转差频率。图 1-1 中曲线 II 为负载的阻转矩特性。曲线 I 和曲线 II 的交点 1 即为 $f_s = K_1$ 时的稳定工作点。

如果变频调速传动系统为频率的开环系统,即对电机的转差频率不加控制,则当提高定子频率时,由于机械惯性的原因,转子旋转频率几乎不变,因而转差频率和转差率均将增大,从而转矩增大。例如,定子频率由 $f_s = K_1$ 提高到 $f_s = K_2$ 时,电机所产生的转矩将由点 1 增到点 2'。于是电动机加速,最后达到新的稳定工作点 2。同样,当迅速降低定子频率时,例如由 $f_s = K_1$ 降到 $f_s = K_3$ 时,电机所产生的转矩将由点 1 变到点 3', 出现电机的轴转速高于

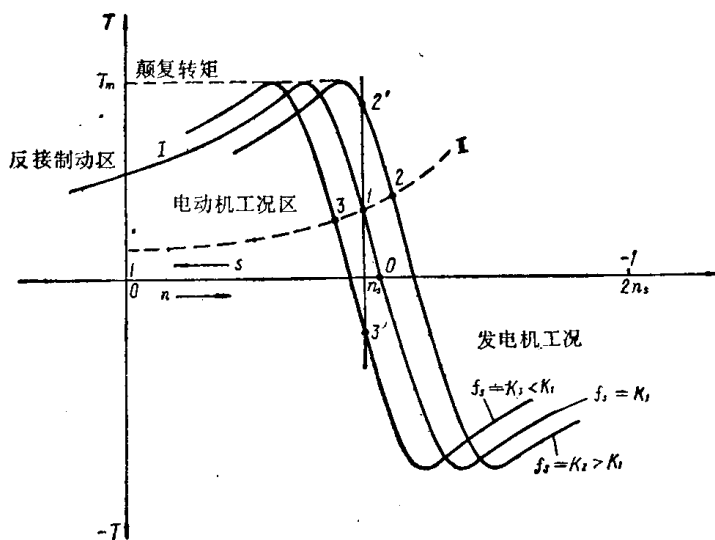


图 1-1 异步电动机转矩——转速特性及负载阻转矩特性

同步转速的情况。在惯性负载作用下电机加速,也会出现转速超过同步速的情况。这时,转差率为负值,电机进入发电机工作状态。于是,电机轴上的机械能被转换为电能。根据变频调速系统主电路结构和控制方法的不同,这个电能或者被反馈到电源中去(再生制动)或者消耗在外接电阻与主电路中(能耗制动)。因此,电动机减速,最后达到新的稳定工作点3。

由上述分析可知,在转差频率不加控制的频率开环系统中,定子频率的调节不能过快,否则将超过颠覆点而停机。

如果在起动时改变定子电源的相序,气隙磁场的转向就会反向,从而使电机以相反方向旋转。如果在运行中突然改变定子电源的相序,则与定子磁场转向相比,转子转速变为负值,由式(1-2)可知,这时 $s > 1$,电机为反接制动工作状态。对于鼠笼式异步电机由于不能外接转子电阻限制转子电流,反接制动时,定、转子电流将急骤增加。因而,实际上,鼠笼式异步电机不宜采用这种反接制动方式。

如果一个变频调速传动系统能使电动机在正、反两个方向上都能以电动机工况运行,又能以发电机工况运行就称这个系统可以四象限运行。

在工频电源下运行的鼠笼式异步电动机,起动电流一般为额定电流的5~6倍,但起动转矩却较小。这是由于起动时转差频率较高,转子漏抗增大,因而转子功率因数下降造成的。在变频调速系统中,以低频起动,可以提高起动时转子的功率因数,从而增大了每安培转子电流所产生的转矩。因而,即使在重载下起动,一般起动电流也只有额定电流的2倍左右。

下面介绍几种典型的转矩——转速特性。

图1-2为不能使气隙磁通保持恒定时,不同定子频率下的转矩——转速特性。这种调速特性适用于风机、水泵一类的负载。图1-3为保持气隙磁通恒定时不同定子频率下的转矩——转速特性,这种特性适用于恒值负载。当定子电压和定子频率都调到额定值以后,如果再提高定子频率以扩大调速范围,限于电机的耐压水平和变频电源的入端电压,定子电压必须保持不变,因而随着定子频率的提高,气隙磁通将逐渐减弱,电机的转矩——转速特性如图1-4所示。这时,电机只能以恒功率运行,它的输出转矩必须随转速的升高而反比例地降低。

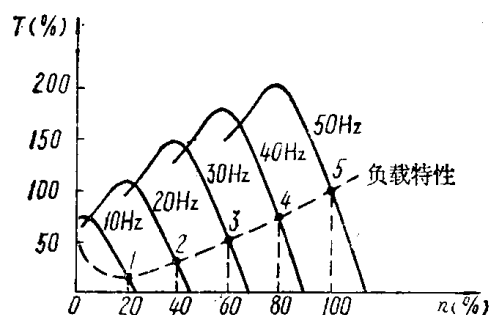


图1-2 磁通不恒定时转矩——转速特性

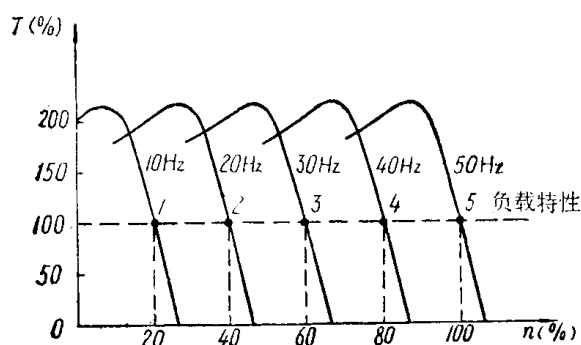


图1-3 磁通恒定时转矩——转速特性

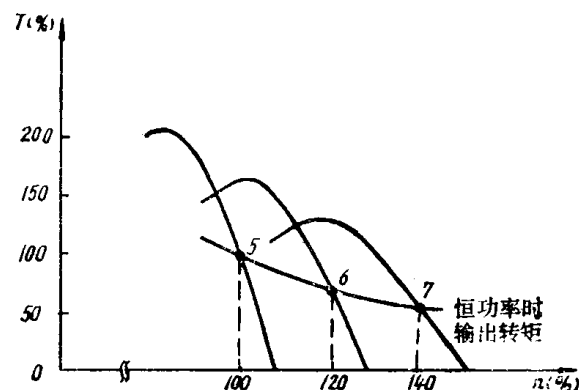


图1-4 定子电压恒定时的转矩——转速特性

以上,认为变频电源为正弦波,即只考虑了变频电源的基波分量。可是晶闸管变频器的输出波形中,除基波以外还包含一系列谐波成分。谐波使电机的损耗增加、温度上升并引起转矩脉动。

二、同步电机变频调速的基本原理

同步电动机的转速只决定于电源的基波频率

$$n = \frac{60f_s}{n_p} \quad (\text{r/min}) \quad (1-8)$$

因此,在同步电动机变频调速系统中不必设置速度反馈控制回路,只要精确地控制变频电源的频率就能精确地控制转速。

只考虑变频电源的基波分量时,同步电动机的转矩特性和固定频率时的转矩特性是相同的。即

$$T = \frac{n_p}{2\pi f_s} \cdot \frac{3UE_0}{x_d} \sin \delta + \frac{n_p}{2\pi f_s} \cdot \frac{3U^2(x_d - x_q)}{2x_d x_q} \sin 2\delta \quad (1-9)$$

式中 U ——定子绕组相电压 (V);

E_0 ——每相空载电势 (V);

x_d ——纵轴同步电抗 (Ω);

x_q ——横轴同步电抗 (Ω);

δ ——功率角。

与异步电动机相同,变频调速时,为了保持磁通恒定,使电源电压随电源频率成正比例变化是必要的。

图 1—5 为频率和电压一定时,同步电动机的转矩——转速特性。其中虚线表示同步电动机利用起动绕组异步起动时的起动特性。一旦牵入同步,同步电动机就获得完全硬的转矩——转速特性。图 1—6 为磁通恒定时变频调速特性。

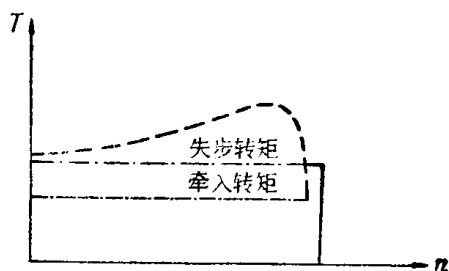


图 1—5 一定频率、电压下同步电动机的转矩——转速特性

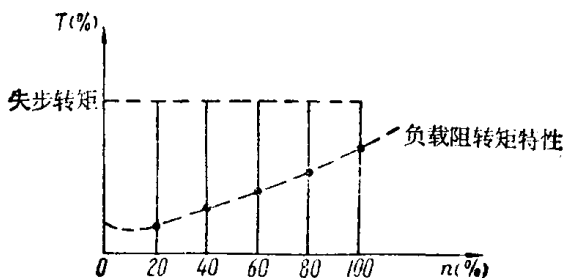


图 1—6 磁通恒定时同步电动机的转矩——转速特性

异步电动机的功率因数是随运行工况而变化的,是不可控的,而且总是滞后的。同步电动机的功率因数和异步电动机的不同,它可以通过改变励磁电流来控制,因此,通常能够保持功率因数 $\cos \varphi = 1$ 来运行。对于小容量的永磁式同步电动机,其功率因数虽然不能控制,但和相同容量的异步电机相比也要大 (10~20) %。

第二节 交流电机变频调速系统的电力变换装置

交流电机进行变频调速, 自然需要一个能够变频和调压的电力变换装置。交流电机变频调速系统即由交流电机、可以变频、调压的电力变换装置及其控制电路等组成。电力变换装置的电路结构有许多种类, 对交流电机的特性也有不同的影响, 近年来已有许多专著进行了较为详细的论述。本节只对主要的电力变换装置及其特点作一简要介绍。

根据能量变换的形式不同, 电力变换装置可以分为直接变换装置及间接变换装置两类:

1. 直接变换装置 直接变换装置通常称为直接变频器、交——交变频器或循环变频器。它可以直接把电源频率的交流电变换为较低频率的交流电。在电路结构上, 它由接到同一交流电源上的若干个相控整流器所组成。按照一定的规律控制各相控整流器的控制角, 使整流器工作在整流或有源逆变状态, 在循环变频器的输出端就可以得到由多相整流波的包络线所组成的较低频率的交流电。

2. 间接变换装置 间接变换装置是先把电源频率的交流电整流为直流电, 经过中间直流电路(又称中间直流环节)以后, 再逆变(无源逆变)为频率可调的交流电。中间直流电路两侧的变流器(整流器和逆变器)必须能够在互不干扰的情况下工作, 故中间直流电路要有大电容或大电感作为储能元件。在中间直流电路的正、负两端是并联大电容器作为储能元件的, 它能大大降低电源侧的阻抗, 从而可以看成是一个电压源。通常把这种电力变换装置称为电压型逆变器。在中间直流电路中串接大电抗器作为储能元件的, 能大大增加电源侧的阻抗, 从而可以看成是一个电流源。通常把这种电力变换装置称为电流型逆变器。

根据中间直流电路的电压是否可调, 又可分为中间直流电压可调的间接变换装置和中间直流电压恒定的间接变换装置。因此, 电压型逆变器有中间直流电压可调的与中间直流电压恒定的两种; 同样, 电流型逆变器也有中间直流电压可调与中间直流电压恒定的两种。

下面对属于直接变换装置的循环变频器以及属于间接变换装置的电压型逆变器和电流型逆变器分别加以介绍。

一、循环变频器

图 1—7 (a) 所示是循环变频器的一种, 称为单相正弦波电压型循环变频器。它由正、负两组三相桥式全控整流器组成。这里, 循环变频器供电给电机绕组, 为感性负载, 感性负载使电流保持连续。循环变频器可采用调制式相控触发方法。所谓调制式相控触发, 是用控制信号波 V_c 和与电源同步的调制信号波 V_r 的交点来决定触发脉冲发出的时刻, 故这种方法又称为波形交叉法。图 1—7 (b) 中表示出 V_c 和 V_r 均为三角波时触发脉冲列的生成方法(这里, V_r 具有正、负两种斜率, 图中只画出 V_r 三角波的一个边)。以这样的脉冲列适当触发晶闸管, 在循环变频器的输出端就可以使三相整流电压的平均值(图 1—7 b 中虚线所示)按正弦规律变化, 即得到一个电压平均值为正弦形的输出电压。然而, 晶闸管中的电流只能单向流通, 为了使输出电流是交变的, 即得到一个完整周期的交流电流, 必须使正、负两组可控整流器反并联连接。输出电流的正半周通过正组可控整流器; 输出电流的负半周则通过负组可控整流器。由于负载为感性, 故电流滞后于电压一个功率因数角 φ 。当一相可控整流器的输出电压与电流同向时, 则该组可控整流器工作在整流状态; 当电压与电流反向

时,可控整流器工作在有源逆变状态。由一组可控整流器向另一组可控整流器的切换,需要一定的切换时间,为了不使电流断续,在切换期间应使两组可控整流器都处于导通状态,但要使正组的控制角 α_p 与负组的控制角 α_N 保持 $\alpha_p = \pi - \alpha_N$ 的关系,这样,两组可控整流器的输出电压(平均值)大小相等,方向相反,从而在组间不会形成大的低频环流。然而,两组的电压瞬时值相差很大,这会在组间产生高频的环流,为此,需要接入组间电抗器 L_p 加以限制。这种循环变频器也称作有环流循环变频器。此外也有无环流循环变频器,它是采用封锁不输出负载电流的那一组整流器中的所有晶闸管来抑制环流的,因此可以不接入组间电抗器 L_p ,但切换期间电流断续。

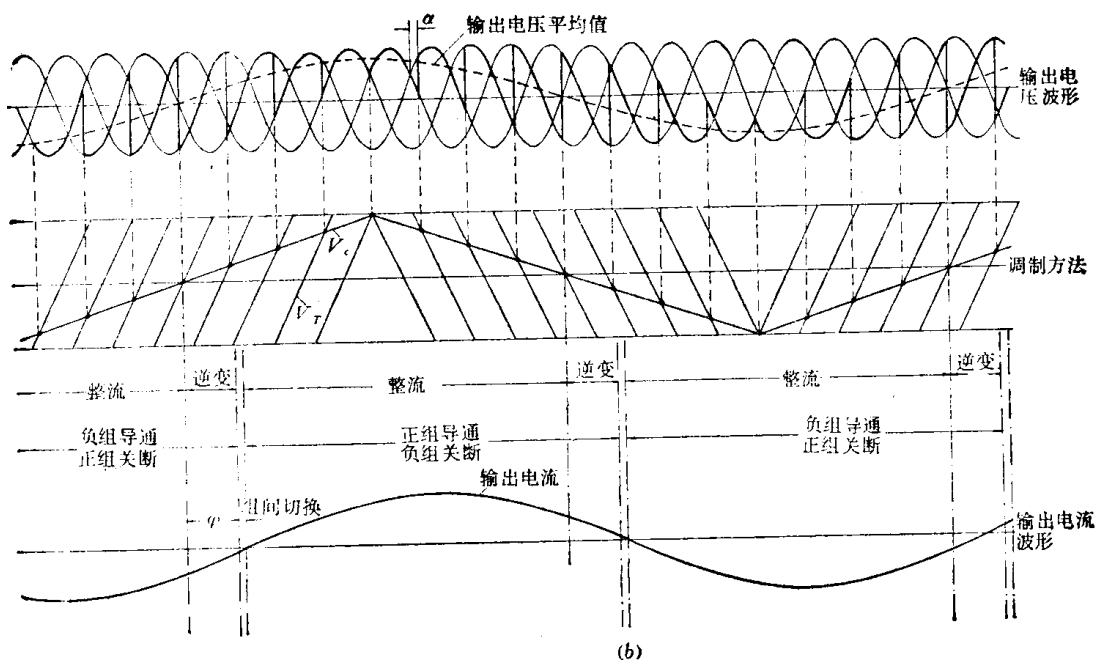
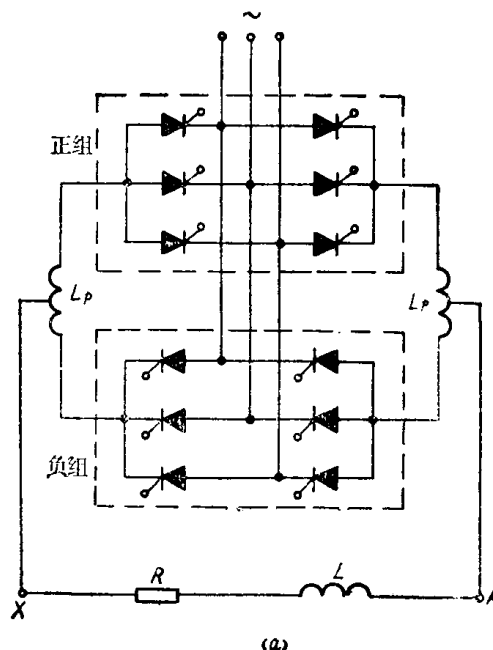


图 1-7 正弦波循环变频器
(a) 主电路（一相）；(b) 调制方法与输出电压、电流波形。

当按照一定的控制规律改变控制角 α 触发一个晶闸管使它由截止转为导通时,另一个晶闸管则应该由导通转为截止,这个过程称为晶闸管电路的换流。由于这种晶闸管本身没有关断能力,所以要在晶闸管上加反向电压(称换流电压)或使流过它的电流为零才能实现换流。如果不必设置产生换流电压的专门电路(称换流电路),可以靠电源电压或负载反电势每半周的自然反向完成换流的称为自然换流。其中,靠电源电压提供换流电压的称为电源换流;靠负载反电势提供换流电压的称为负载换流。如果不能依靠电源电压或负载反电势进行自然换流,因而必须设置专门的换流电路来提供换流电压以进行换流的,称为强迫换流。

图 1—7 所示循环变频器中晶闸管的换流为电源换流。为了由电源电压提供换流电压，控制角 α 不能大于 180° ，而且要比 180° 小一定的角度，以便给换流重叠角和恢复晶闸管的阻断能力留出足够的裕度。

由于正、负两组可控整流器的控制角必须具有 $\alpha_p = \pi - \alpha_N$ 的关系，因此，当 α_N 的最大值为小于 180° 的 $\alpha_{N\max}$ 时，则 α_p 有一个相应的最小值 $\alpha_{p\min}$ 。于是，控制角的调节范围只能是 $\alpha_{\min} (>0^\circ) \sim \alpha_{\max} (<180^\circ)$ 。在 $\alpha_{\min} \sim \alpha_{\max}$ 范围内按一定规律改变各晶闸管的控制角即可得较低频率的输出电压。

输出频率的调节可由改变正组和负组整流器的开关周期来实现。具体地说，对于图 1—7 所示的调制式相控触发方法，输出基波频率是和控制信号波 V_c 同频率的，调节控制信号波 V_c 的频率即可调节输出基波频率。输出电压的调节可通过改变正组和负组整流器实际的控制角最小值来达到：使实际的控制角最小值增大，则输出电压降低；反之，在保证可靠换流的前提下使实际控制角最小值减小，则输出电压升高。具体地说，对于图 1—7 所示调制式相控触发方法，输出电压的大小和控制信号波 V_c 的幅值成正比，调节 V_c 的幅值就可以调节输出电压。

根据循环变频器是输出电压还是输出电流，可分为电压型循环变频器和电流型循环变频器；根据调制方式的不同，输出波形也有正弦波、梯形波或方波等之分；根据相数的不同，有单相、三相或多相循环变频器等。下面简单介绍一下在交流电机变频调速系统中常用的三相正弦波电压型循环变频器和三相方波电流型循环变频器。

(一) 三相正弦波电压型循环变频器

图 1—8 (a) 为三相输入、三相输出的正弦波电压型循环变频器的主电路，它由如图 1—7 (a) 所示的三个单相循环变频器组成，三个单相循环变频器控制信号波的相位应互差 120° 。各组导通顺序如图 1—8 (b) 中所示，每组导通时间为 120° ，每隔 60° 进行一次组间换流。每一组中晶闸管的换流为电源换流。至于组间换流，当给同步电动机供电时可以进行反电势换流；当给异步电机供电时，由于电机的功率因数是滞后的，不能进行反电势换流而只能进行电源换流，所以组间换流要等待组中晶闸管电源换流的时机、与晶闸管电源换流同时进行，因此，输出电压的频率只能取电源频率的整数分之一，如 $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, ……，等等。

图 1—8 (c) 为典型的输出相电压波与输出相电流波的示波图（电机均假定为星形接法，如为三角型接法认为已换算为等效的星形，下同）。

改变三相控制信号波 V_c 的相序即可改变三相输出电压的相序，从而可使电机正、反转。此外，由于通过改变控制角 α 可使循环变频器的整流状态与逆变状态自动互相转换，从而可以方便地实现电源与负载间的功率交换。因此，用循环变频器构成的交流电机变频调速系统可以实现四象限运转。

(二) 三相方波电流型循环变频器

图 1—9 (a) 为三相方波电流型循环变频器，它由 18 臂晶闸管和三组电抗器组成。18 臂晶闸管可分成 6 个组。1、3、5 为正组，2、4、6 为负组，各组导通顺序和图 1—8 (b) 所示相同。由于电抗器的作用，输出电流为 120° 的方波，图 1—9 (b) 是典型的输出电流、电压的示波图。

以上两种循环变频器具有如下共同的优点：

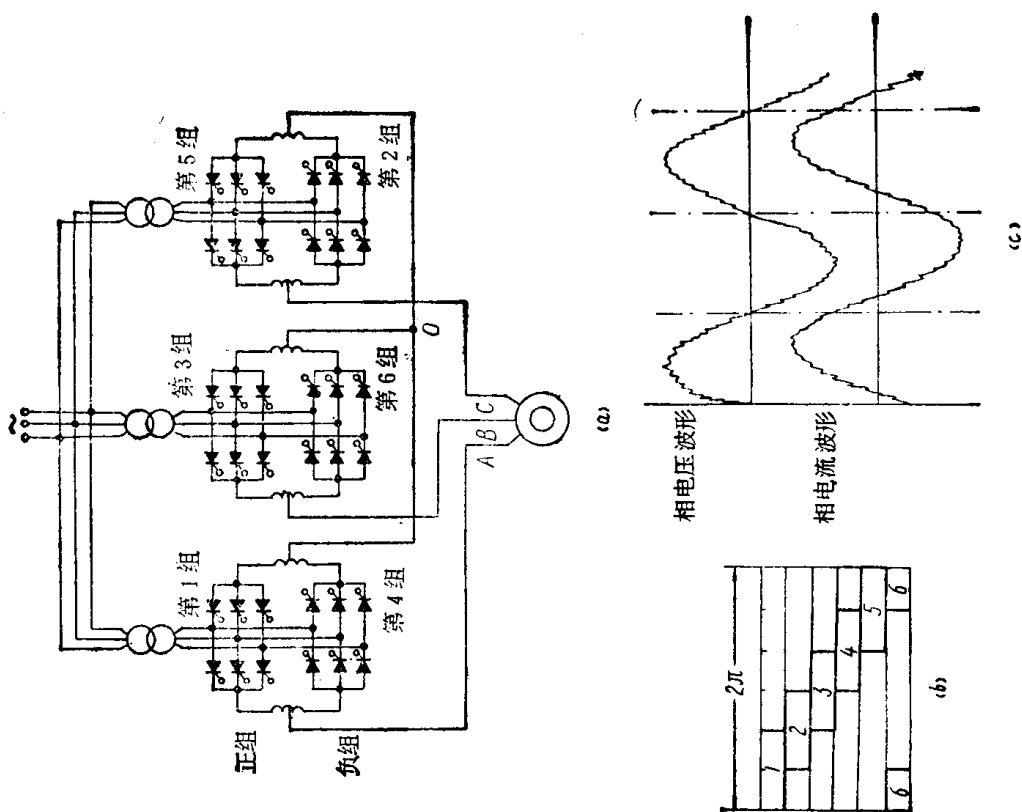


图 1—8 正弦波循环变频器
(a) 主电路; (b) 各组导通顺序; (c) 输出相电压与相电流波形。

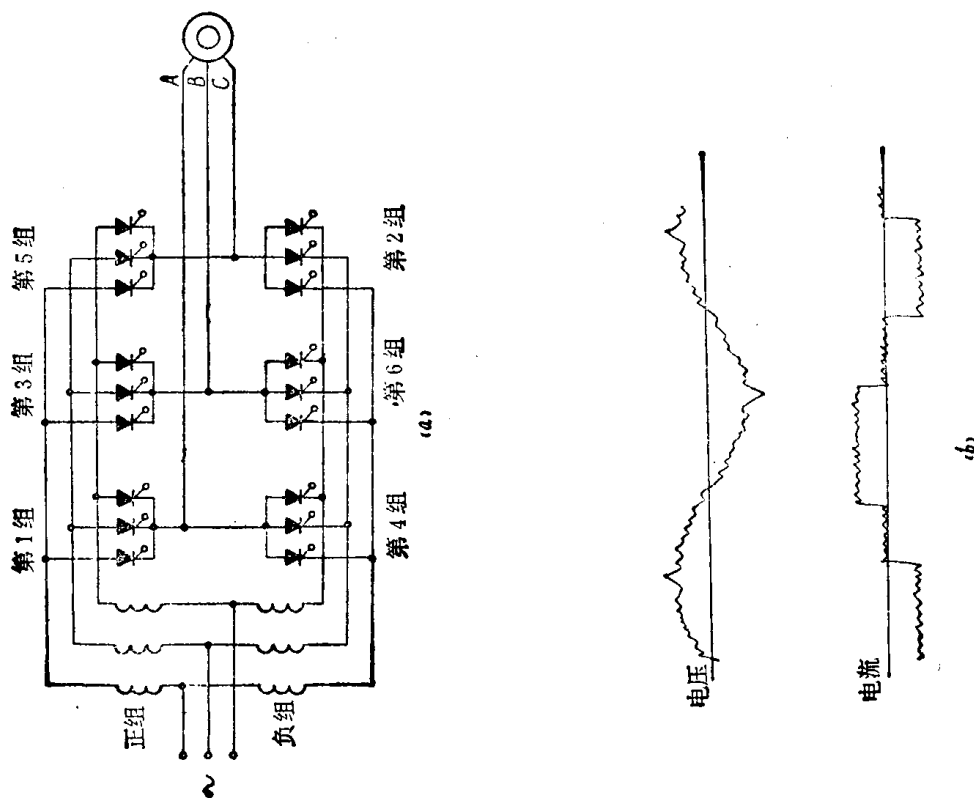


图 1—9 三相电流型循环变频器
(a) 主电路; (b) 输出电压、电流波形。

1. 由于是直接变换装置，所以电路中的损耗小，变换效率高；
2. 能快速地实现四象限运行的转换；
3. 由于是自然换流，电路简单，故可制成可靠性高的大容量变换装置；
4. 不必使用快速晶闸管。

它们的共同缺点是：

1. 由于随着输出频率的提高，电压和电流的畸变增大，因此输出的最高频率受电源频率的限制。一般输出频率限制为电源频率的 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ ；
2. 所用的晶闸管元件较多，控制线路也较复杂；
3. 输入功率因数较低。

因此，由工频电源供电时，循环变频器只适用于低速、大容量系统中。如果需要扩大调速范围，则需要设置专用的中频电源，例如由燃气轮机拖动的三相交流中频发电机等。

二、电压型逆变器

如前所述，电压型逆变器属于间接变换装置，分为中间直流电压可调和中间直流电压恒定的两种。

（一）中间直流电压可调的电压型逆变器

图 1—10 是中间直流电压可调的电压型逆变器的一种（图中未画出用以强迫换流的换流电路），它是用电源侧的相控整流器来调节直流电压的，其电路构成方式如图 1—11 所示。此外，还有图 1—12、图 1—13 所示的电路构成方式。

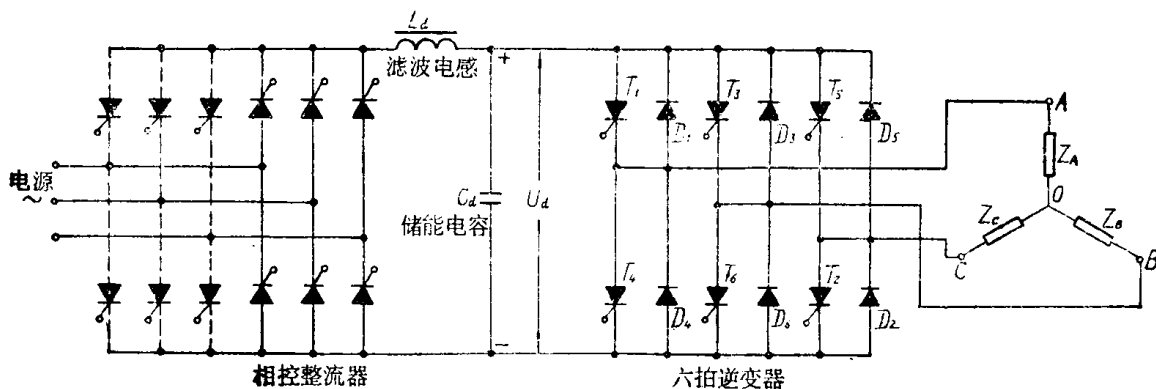


图 1—10 中间直流电压可调的电压型逆变器

图 1—11 中相控整流器的换流方式是电源换流，而逆变器由于是由中间直流环节供电，故必须采用强迫换流方式。图 1—12 中不控整流器为电源换流，而直流斩波器为强迫换流方式。图 1—13 中的四象限变流器也为强迫换流方式。

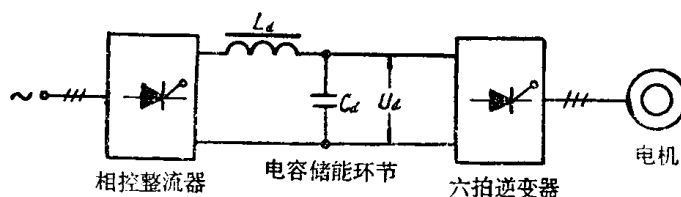


图 1—11 中间直流电压可调的电压型逆变器电路构成方式之一

中间直流电压可调的电压型逆变器的导通方式分 180° 导通型和 120° 导通型两种。 180° 导通型，在任意瞬间逆变器每一桥臂上各有一只晶闸管导通，每一晶闸管的导通时间为 180° ，

每隔 60° 换流一次。各晶闸管的导通顺序、负载等值电路以及相电压和线电压数值如表1—2所示。 120° 导通型，在任意瞬间只有两只晶闸管同时导通，每一晶闸管导通时间为 120° ，也是每 60° 换流一次，各晶闸管导通顺序、负载等值电路和输出电压值如表1—3所示。由于这两种导通方式都是每隔 60° 换流一次，所以称为六拍逆变器。

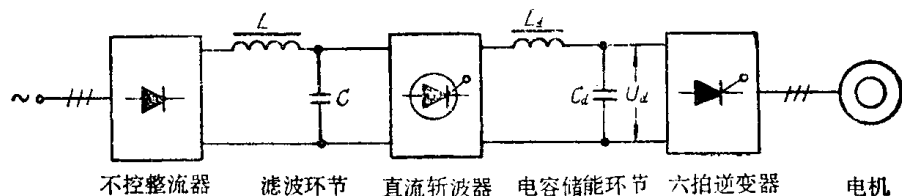


图1—12 中间直流电压可调的电压型逆变器电路构成方式之二

由于中间直接环节接有大容量的储能电容以及逆变器的主晶闸管上反并联了续流二极管（或称反馈二极管，图1—10中 $D_1 \sim D_6$ ），把逆变器输出的电压箝位于中间直流电压值，故输出电压为平顶波。当逆变器为 180° 导通型时，输出相电压与线电压的波形如图1—14所示，相电压为六阶梯波，线电压为方波。逆变器为 120° 导通型时，输出相

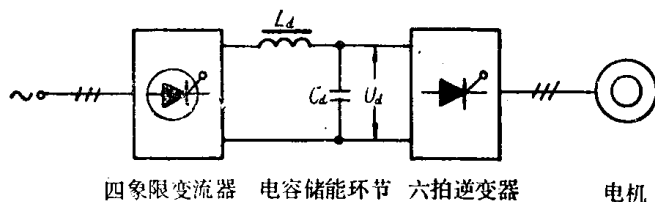


图1—13 中间直流电压可调的电压型逆变器电路构成方式之三

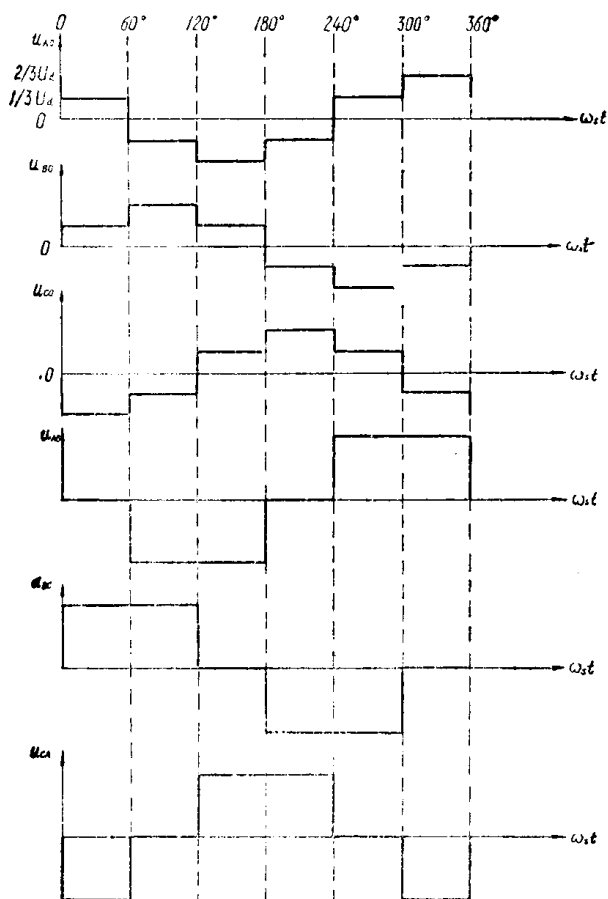


图1—14 180° 导通电压型逆变器输出电压波形（星形负载）

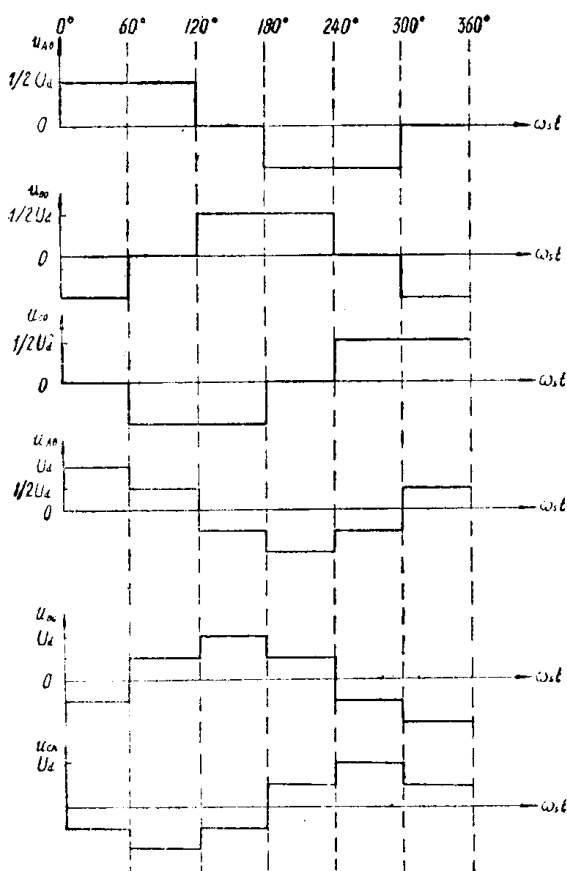


图1—15 120° 导通电压型逆变器输出电压波形

180°导通电压型逆变器导通顺序及相电压值

表 1-2

$\omega_s t$		$0^\circ \sim 60^\circ$	$60^\circ \sim 120^\circ$	$120^\circ \sim 180^\circ$	$180^\circ \sim 240^\circ$	$240^\circ \sim 300^\circ$	$300^\circ \sim 360^\circ$
导通的晶闸管		T_1, T_2, T_3	T_2, T_3, T_4	T_3, T_4, T_5	T_4, T_5, T_6	T_5, T_6, T_1	T_6, T_1, T_2
负载等值电路							
输出相电压值	u_{AO}	$+\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{2}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$	$+\frac{1}{3}U_d$	$+\frac{2}{3}U_d$
	u_{BO}	$+\frac{1}{3}U_d$	$+\frac{2}{3}U_d$	$+\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{2}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$
	u_{CO}	$-\frac{2}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$	$+\frac{1}{3}U_d$	$+\frac{2}{3}U_d$	$+\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$
输出线电压值	u_{AB}	0	$-U_d$	$-U_d$	0	$+U_d$	$+U_d$
	u_{BC}	$+U_d$	$+U_d$	0	$-U_d$	$-U_d$	0
	u_{CA}	$-U_d$	0	$+U_d$	$+U_d$	0	$-U_d$

120°导通电压型逆变器导通顺序及输出电压值

表 1-3

$\omega_s t$		$0^\circ \sim 60^\circ$	$60^\circ \sim 120^\circ$	$120^\circ \sim 180^\circ$	$180^\circ \sim 240^\circ$	$240^\circ \sim 300^\circ$	$300^\circ \sim 360^\circ$
导通的晶闸管		$T_6、T_1$	$T_1、T_2$	$T_2、T_3$	$T_3、T_4$	$T_4、T_5$	$T_5、T_6$
负载等值电路							
输出相电压值	u_{AO}	$+\frac{1}{2}U_d$	$+\frac{1}{2}U_d$	0	$-\frac{1}{2}U_d$	$-\frac{1}{2}U_d$	0
	u_{BO}	$-\frac{1}{2}U_d$	0	$+\frac{1}{2}U_d$	$+\frac{1}{2}U_d$	0	$-\frac{1}{2}U_d$
	u_{CO}	0	$-\frac{1}{2}U_d$	$-\frac{1}{2}U_d$	0	$+\frac{1}{2}U_d$	$+\frac{1}{2}U_d$
输出线电压值	u_{AB}	$+U_d$	$+\frac{1}{2}U_d$	$-\frac{1}{2}U_d$	$-U_d$	$-\frac{1}{2}U_d$	$+\frac{1}{2}U_d$
	u_{BC}	$-\frac{1}{2}U_d$	$+\frac{1}{2}U_d$	$+U_d$	$+\frac{1}{2}U_d$	$-\frac{1}{2}U_d$	$-U_d$
	u_{CA}	$-\frac{1}{2}U_d$	$-U_d$	$-\frac{1}{2}U_d$	$+\frac{1}{2}U_d$	$+U_d$	$+\frac{1}{2}U_d$