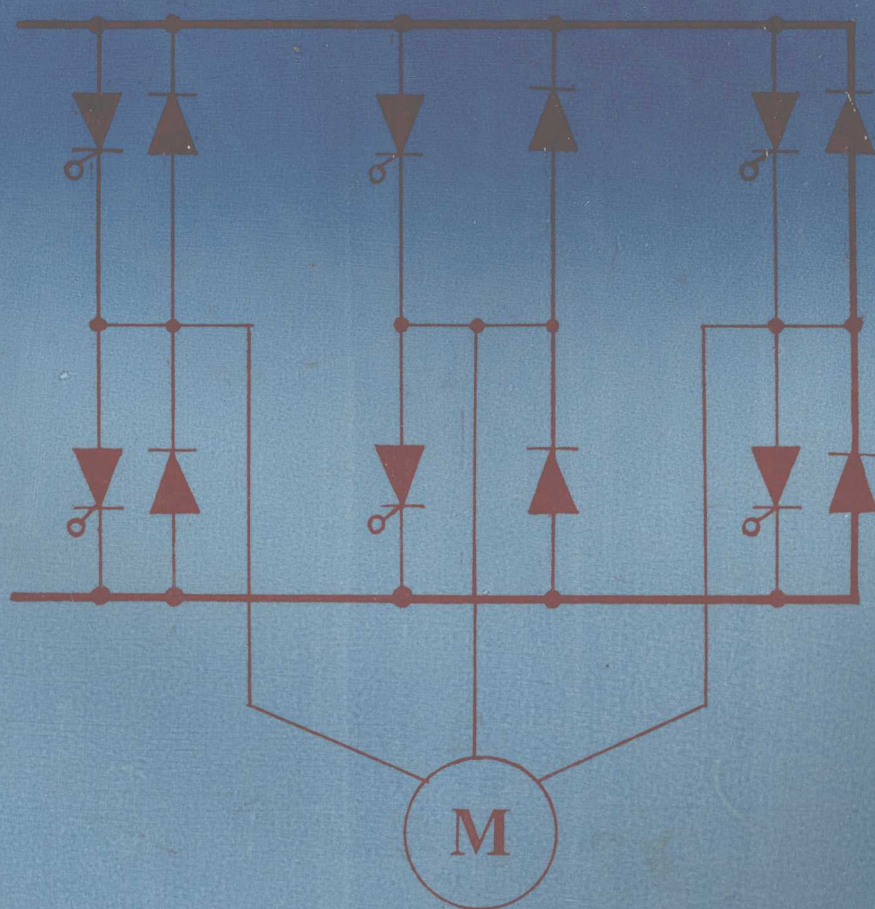


变频器及其调速系统

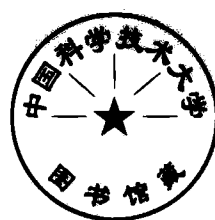
姜桂泉 编著



武汉工业大学出版社

变频器及其调速系统

姜桂泉 编著



武汉工业大学出版社

(鄂)新登字13号

内 容 简 介

本书主要讨论交流变频调速。第一章介绍了变频器的种类及交-交变频器;第二、三章讨论了电压型、电流型变频器的换流过程、元件参数选择及相关问题;第四章对脉宽调制变频器的工作原理、波形生成以及功率晶体管的使用特性和基极驱动电路等内容作了较为详细的分析;第五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协调控制特性及其在工业中的应用示例进行了较深入的研究;第六章论述了异步电机的数学模型、坐标变换、矢量控制及其变频调速系统。

本书可供从事交流变频调速系统研究、设计和运行的科技人员及大专院校相关专业的师生参考。

变 频 器 及 其 调 速 系 统

娄桂泉 编著

责任编辑 朱家万

责任校对 童南雄

*

武汉工业大学出版社出版发行

武汉工业大学出版社印刷厂印刷

*

开本: 787×1092mm 1/16 印张: 10 字数: 225千字

1993年2月第一版 1993年2月第一次印刷

印数: 1—1500

ISBN 7-5629-0733-1/TP·14

定价: 7.00元

前 言

交流调速是一种节约能源和更新工艺的极为有效的控制技术，也是当今国内外学者众所关注的重大研究课题。交流调速的种类繁多，但其中交流变频调速则是一种效率最高、性能最优的交流调速方案。

长期以来，由于直流电动机以其优良的控制性能，在电气调速领域中占有主导地位。众所周知，直流电机的换向结构复杂，维修频繁，电压、容量、转速的极限定额不能作得太高，而且环境适应性差等因素限制了它的使用范围。交流电机由于结构简单，各种参数定额可以作得较高，运行中事故率极少，可用于各种恶劣环境，而且交流电机在整个国民经济用电量中占有极大的比例，其中需要调速（如风机、水泵和空压机等）的交流电动机容量至少占60%以上。但是，过去由于难于实现交流电机的调速，只好利用挡板或节流阀等机械装置来控制上述泵类机械负载的流量，因此，电能的无益浪费是十分惊人的。随着电力电子和微电子技术—计算机技术及交流调速的控制理论飞速发展，时至今日，已为实现各类交流调速奠定了雄厚的物质和理论基础。特别是近二十年来，在国外交流调速发展十分迅速，与直流调速性能可以完全媲美、且由于交流电机惯量小，而控制性能优于直流调速系统的系列产品已相继出现，形成了“以交代直”的新格局。有的国家已经严格限制直流调速装置的生产规模。我国的交流调速近年来也有迅猛的发展，但由于元器件等诸多因素的不配套，与国外先进技术相比，尚有很大的差距。不过，我国政府十分重视节能，对交流调速在国民经济中的重要作用一直是很关注的，因此，可望能在不久的将来赶上甚至超过某些先进发达国家。

多年来，苦于追求我国交流调速的发展，根据自己的教学积累和工作实践的初浅体会，深感交流变频调速是最有发展前景的高效率、高性能的调速方案，因此我撰写了《变频及其调速系统》一书，希望能起到抛砖引玉的作用，更愿祖国的交流调速事业迅速发展。

本书第1~3章比较详细地讨论了几类变频器的线路结构、换流原理及其动态过程、波形分析和元件参数选择等；第4章阐述了脉宽调制变频器的原理、波形生成、波形分析以及相关的大规模集成电路等；第5章分析了电压（流）与频率稳态协调控制理论与规律，在此基础上介绍了几种典型交流变频调速系统、交流调速在工业中应用的示例以及采用微型机控制的具体方法和程序框图；第6章论述了交流电机的数学模型、矢量变换控制理论及几种矢量控制的变频调速系统和微偏模型。

在本书整理过程中，得到了华中理工大学博士导师、教授王离九和武汉水利电力学院教授黄守盟的指导和细心审阅，也得到不少同行和专家的有益帮助，同时，武汉工业大学自动化系的领导和有关同志对书稿的整理、校对、誊写，特别是王暖讲师为全书的插图付出了辛勤劳动，作者在此一并致谢。

由于作者业务水平、教学经验、工程实践经验十分有限，本书中错误和不当之处在所难免，殷切希望读者和同行专家批评指正。

作 者

1992年10月

目 录

第一章 交-交变频器	(1)
§ 1-1 变频器的分类	(1)
一、间接变频器	(1)
二、直接变频器	(2)
三、电压源型和电流源型变频器	(2)
四、各类变频器的主要特点	(3)
§ 1-2 交-交变频器	(4)
一、方波型交-交变频器	(4)
二、正弦型交-交变频器	(5)
第二章 交-直-交电压源型变频器	(9)
§ 2-1 串联电感式逆变器	(9)
一、换流原理	(9)
二、换流元件参数的计算	(12)
三、三相串联电感式逆变器的输出电压波形分析	(14)
§ 2-2 具有辅助晶闸管换流的变频器	(16)
一、换流原理	(16)
二、换流元件参数的计算	(19)
§ 2-3 电感储能式变频器	(21)
§ 2-4 串联二极管式电压型变频器	(24)
一、电阻性负载的换流过程	(24)
二、电感性负载的换流过程	(25)
§ 2-5 电压型逆变器直流滤波回路参数的选择	(26)
一、逆变器输入电流及滤波电容器电压波动的分析	(26)
二、滤波电容器 C_d 的选择	(28)
三、滤波电感 L_d 的选择	(29)
四、讨论	(29)
第三章 交-直-交电流源型变频器	(31)
§ 3-1 串联二极管式电流型变频器	(31)
一、换流原理	(32)
二、二极管换流的暂态分析	(33)
三、元件参数选择	(34)
四、几个值得讨论的问题	(36)
§ 3-2 换流浪涌电压吸收环节	(37)
一、换流过程的分析	(37)
二、 t_r 、 t_c 及 t_q 之求解	(38)
三、电压吸收装置的功率	(40)

四、电压吸收装置的几种线路分析	(40)
§ 3-3 低频换流	(41)
一、断续换流方式	(41)
二、附加辅助充电回路	(42)
§ 3-4 滤波电感器的选择	(43)
一、按电流连续选择电感值	(43)
二、按限制电流脉动率选择滤波电感值	(44)
三、选择滤波电感值应考虑的因素	(44)
§ 3-5 电流型变频器的多重化技术	(44)
一、逆变器直接并联的独立直流电源方式	(46)
二、逆变器通过变压器耦合输出的方式	(47)
三、各种多重化电流型变频器比较	(48)
§ 3-6 电流型逆变器换流电路的其它型式	(50)
一、用辅助晶闸管换流的电流型逆变器	(50)
二、用一个换流电容器的电流型逆变器	(50)
三、缩短换流时间的电流型逆变器	(51)
四、用可关断元件换流的电流型逆变器	(51)
第四章 正弦波脉宽调制 (SPWM) 变频器	(53)
§ 4-1 SPWM变频器的工作原理	(53)
一、单极性SPWM变频器的输出电压	(53)
二、双极性三相SPWM变频器的输出电压	(56)
§ 4-2 消除指定谐波的PWM变频器的输出电压	(57)
§ 4-3 SPWM逆变器的调制约束与调制方式	(59)
一、调制约束条件	(59)
二、SPWM的调制方式	(60)
§ 4-4 SPWM调制脉冲波形的生成	(61)
一、微机生成的SPWM波形的的基本方法	(61)
二、大规模集成电路——THP4752生成SPWM波形	(64)
§ 4-5 “ Δ ”脉宽调制变频器	(66)
§ 4-6 晶体管的工作特性及使用	(68)
一、晶体管的工作区	(68)
二、晶体管的开关过程	(69)
三、晶体管的阻容吸收电路	(71)
四、晶体管的开关时间	(72)
五、晶体管的开关损耗	(73)
六、泵升电压限制与过流保护	(74)
§ 4-7 功率晶体管的驱动电路	(75)
一、开关晶体管对驱动电路的要求	(75)
二、M57215BL基极驱动电路	(76)
三、UAA4002基极驱动电路	(77)
四、场效应管组成的驱动电路	(79)
第五章 异步电机变频调速系统	(83)
§ 5-1 变频调速的基本控制方式	(83)

一、基频以下调速·····	(83)
二、基频以上调速·····	(84)
§ 5-2 异步电动机电压、频率协调控制的稳态转矩特性·····	(84)
一、恒压频比 ($U_1/\omega_1 = \text{常数}$) 控制的转矩特性·····	(84)
二、恒最大转矩 T'_{em} 控制的转矩特性·····	(86)
三、恒 E_g/ω_1 (恒气隙磁通 φ_g) 控制的转矩特性·····	(88)
四、恒 E_r/ω_1 (恒转子磁通 φ_r) 控制的转矩特性·····	(88)
§ 5-3 电压频率协调控制的调节特性及控制系统·····	(89)
一、电压源型变频器供电·····	(89)
二、电流源型变频器供电·····	(91)
§ 5-4 电压型变频器—异步电机转速开环系统·····	(95)
一、给定积分器·····	(96)
二、绝对值放大器·····	(97)
三、电压控制环节·····	(97)
四、频率控制环节·····	(98)
五、电压控制系统的动态结构图·····	(99)
§ 5-5 电流型变频器—异步电机转速开环系统·····	(100)
§ 5-6 电流型变频器—异步电机转差频率控制系统·····	(102)
一、基本控制原理·····	(102)
二、系统运行分析·····	(103)
三、转差频率控制系统的近似动态结构图·····	(105)
§ 5-7 微机控制的电压型变频调速系统·····	(107)
一、系统原理框图·····	(107)
二、变频器输出电压的控制·····	(107)
三、逆变器触发频率控制·····	(108)
四、电压环控制·····	(109)
§ 5-8 变频调速在卷筒传动系统中的应用·····	(111)
一、系统的控制规律·····	(111)
二、SPWM变频速率控制系统·····	(112)
三、线速度控制环节·····	(112)
§ 5-9 变频调速在泵类机械负载中的节能应用·····	(114)
一、泵类机械的参数和特性·····	(114)
二、变频器在风机中应用的合理控制·····	(116)
第六章 异步电机的数学模型及矢量控制变频调速系统·····	(118)
§ 6-1 A、B、C系统异步电机的数学模型·····	(119)
一、电压方程式·····	(119)
二、磁链方程式·····	(120)
三、运动方程式·····	(122)
四、转矩方程本·····	(122)
五、A、B、C系统异步电机的数学模型·····	(123)
§ 6-2 坐标变换及变换阵·····	(123)
一、坐标变换的基本原则和基本思路·····	(123)
二、三相/二相变换·····	(125)

三、二相/二相旋转变换.....	(128)
四、直角坐标/极坐标变换.....	(129)
五、由三相静止坐标系到任意二相旋转坐标系上的变换.....	(129)
§ 6-3 异步电动机在二相旋转坐标系上的数学模型.....	(130)
一、异步电动机在任意 $dq\omega$ 坐标系上的数学模型.....	(131)
二、异步电动机在 M 、 T 坐标系上的数学模型.....	(134)
§ 6-4 矢量控制系统的构想及基本关系式.....	(136)
一、矢量控制系统的构想.....	(136)
二、矢量控制的基本关系式.....	(137)
§ 6-5 转子磁链 Ψ_2 的观测模型.....	(138)
一、在二相静止坐标系上的转子磁链观测模型.....	(138)
二、在按磁场定向二相旋转坐标系上的转子磁链观测模型.....	(140)
§ 6-6 矢量控制系统举例.....	(140)
一、交—直—交电流型矢量控制变频调速系统.....	(140)
二、转速、磁链闭环控制的电流跟踪型PWM矢量控制系统.....	(141)
三、微机实现的转差型矢量控制变频调速系统.....	(142)
§ 6-7 磁场定向控制系统的传函和框图.....	(146)
一、磁场定向控制时的状态方程和状态变量图.....	(146)
二、控制系统中的传递函数和框图.....	(148)
参考文献.....	(151)

第一章 交-交变频器

异步电机定子变频调速系统是一种应用广泛的高效率、高性能的交流调速系统。其中实现变压变频功能的变频器是整个系统最关键的部件。

变频器的种类繁多，分类也各异。本章首先介绍它的分类，然后讨论基于电网电压换流方式的交-交变频器。

§ 1-1 变频器的分类

由于交流电网是恒压恒频的，必须通过变频器，才能获得变压变频的电源，这就是所谓的VVVF (Variable Voltage Variable Frequency的缩写)变频器。从结构上看，变频器可分为间接变频器和直接变频器两类，前者先将交流电源通过整流器变为直流，然后再经过逆变器将直流变换为可调压和可调频的交流，因此，又称为有中间直流环节的变频器；后者则是将电网交流直接变为可调压和可调频的交流，没有中间直流环节。当前应用较多的是间接变频器。

一、间接变频器

间接变频器是先将电网交流变为直流，再通过逆变器变为交流，因此又称为交-直-交变频器。按照不同组成与控制方式，它又可分为下列三种形式，如图1-1中的(a)、(b)、(c)所示：

1. 用可控整流器调压、用逆变器调频的交-直-交变频器(图1-1a)。调压和调频分别在两个环节上进行，在控制电路中予以协调配合。这种变频器结构简单，控制方便，但是可控整流器恶化了电网的功率因数，变频器的输出多为三相六阶梯波，谐波成分较大，这是这种变频器的主要缺点。

2. 用不控整流器整流、斩波器调压、逆变器调频的交-直-交变频器(图1-1b)。虽然增加了一个环节，但二极管不控整流器的输入功率因数高；输出逆变环节不变，谐波成分仍然较大。

3. 用不控整流器整流、PWM逆变器同时调压调频的交-直-交变频器(图1-1c)。用不控整流，则功率因数高；用PWM逆变，则谐波成分显

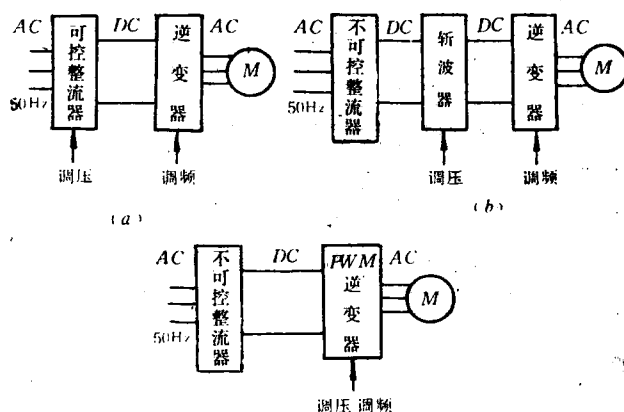


图 1-1 间接变频器的几种组成形式

著减少，变频器仅有一个可控功率级，因而体积小、重量轻、可靠性高，调压和调频都在逆变器内控制和调节，使调节速度快，动态过程中电压和频率的配合好，改善了系统的动态性能。因此，这种正弦波脉宽调制（SPWM）变频器成为当前最有发展前途的一种结构形式。

二、直接变频器

直接变频器的工作原理可以用图1-2所示的对单相负载供电电路来说明。它由两组反并联的变流器 P 和 N 所组成，直接将恒压恒频（CVCF）的交流电源变换成VVVF电源，因此又称交—交变频器或周波变换器（Cycloconverter）。如果 P 组和 N 组轮流地向负载供电，则在负载上就得到交流输出电压 u_o ，其幅值由两组变流器的控制角 α 来调节，其频率则由两组变流器的切换频率所决定。如果控制角 α 一直不变，则输出平均电压为方波（图1-2）；如果要得到正弦波输出电压，就必须在每组变流器导通期间不断改变其控制角 α ，使其平均电压的大小按正弦规律变化（详见§1-2）。

不难看出，对于三相负载，其它两相也要各用一套反并联的可逆线路，输出平均电压依次相差 120° 。因此，三相变频器共用三套反并联线路，其结构相当庞大。不过这种变频器只有一个功率变换环节，没有中间直流环节，而且这些都是直流调速系统惯用的可逆整流装置，在电网电压过零时自然换流，技术已很成熟，对元件没有什么特殊要求。此外，由于输出波形是电网波形整流后得到的，因此，输出的最高频率不可能高于电网频率的 $1/2$ 。鉴于上述元件数量多，输出频率低两方面的原因，直接变频器只用于低转速、大容量的调速系统。

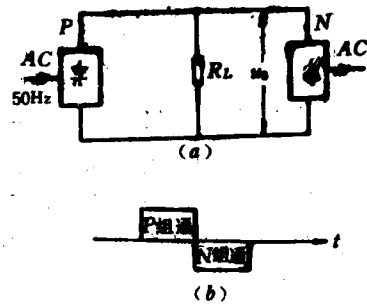


图 1-2 直接变频器的工作原理

三、电压源型和电流源型变频器

在变频调速系统中，变频器的负载通常是异步电动机，其功率因数是滞后的，故在中间直流环节与电动机之间将有无功功率的交换，所以必须在直流环节与电动机之间设置储能元件来缓冲。根据对无功功率处理方式的不同，变频器可以分为电压源型和电流源型两种。

电压源型交—直—交变频器是在直流侧并联大电容以缓冲无功功率（图 1-3a）。在理想情况下，这种直流电源是一种内阻抗为零的恒压源，因此，输出交流电压为矩形波或阶梯波，属于电压强制方式。

一般交—交变频器虽然没有缓冲电容器，但供电电源的低阻抗使它具有电压源型的性质，也属于电压源型变频器。

电流源型交—直—交变频器是在直流侧串联大电感以缓冲无功功率（图 1-3b），故直流电源呈高阻抗，相当一个恒流源，输出交流电流是矩形波或阶梯波，属于电流强制方式。

有的交—交变频器用电抗器将输出电流强制成矩形波或阶梯波，也具有电流源型的性质。

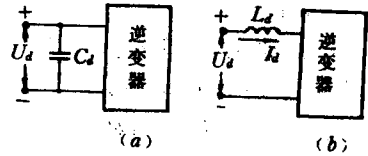


图 1-3 电压源和电流源变频器
(a) 电压源型变频器 (b) 电流源型变频器

四、各类变频器的主要特点

为了更好了解前述各类变频器的特点，下面用表1-1和表1-2来对比说明。[2]

表1-1 交-交变频器与交-直-交变频器主要特点比较

变频器类型 比较内容	交-交变频器	交-直-交变频器
换能方式	一次换能，效率较高	二次换能，效率略低
换流方式	电网电压换流	强迫换流或负载换流
装置元件数量	较多	较少
元件利用率	较低	较高
调频范围	输出最高频率为电网频率的1/3~1/2①	频率调节范围宽
电网功率因数	较低	如用可控整流桥调压，则低频低压时功率因数较低，如用斩波器或PWM方式调压，则功率因数高
适用场合	低速大功率拖动	可用于各种拖动装置、稳频稳压电源和不停电电源

表1-2 电流型与电压型交-直-交变频器主要特点比较

变频器 比较内容	电 流 型	电 压 型
直流回路滤波环节	电抗器	电容器
输出电压波形②	决定于负载，当负载为异步电机时，近似正弦形	矩形
输出电流波形③	矩形	决定于逆变器电压与负载电动机的电动势，有较大的谐波分量
输出动态阻抗	大	小
再生制动	方便，主电路不需附加设备	需要在电源侧设置反并联逆变器
过流及短路保护	容易	困难
动态特性	快	较慢，如用PWM则快
对晶闸管要求	耐压高，对关断时间无严格要求	耐压一般可较低，关断时间要求短
线路结构	较简单	较复杂
适用范围	单机、多机拖动	多机拖动，稳频稳压电源或不停电电源

①交-交变频器如采用强迫换流，则调频范围可以扩大，最高输出频率可以超过电网频率，同时还可以提高电网侧的功率因数，但电流线路复杂，目前还很少采用。

②均指简单的三相桥式逆变器，即不用脉宽调制也不进行多重叠加。

§1-2 交-交变频器

交-交变频器根据其输出电压或电流的波形，可以分为方波型和正弦波型两种。

一、方波型交-交变频器

三相方波型交-交变频器的主回路如图 1-4 所示。它的每一相由两组反并联的三相零式（或桥式）整流电路所组成，共需 18（或 36）个晶闸管。图中整流器 I、Ⅲ、V 为正组，Ⅳ、Ⅵ、Ⅱ 为反组。各组导电时间为 $T/3$ （ T 为输出电压的周期），每组依次相隔 $T/6$ 导通，同一时刻应有正组的一只晶闸管和反组的一只晶闸管同时导通，但不允许同一桥臂同时导电，否则将会造成电源短路。

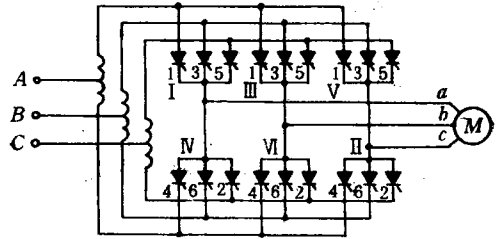


图 1-4 三相方波型交-交变频器主回路

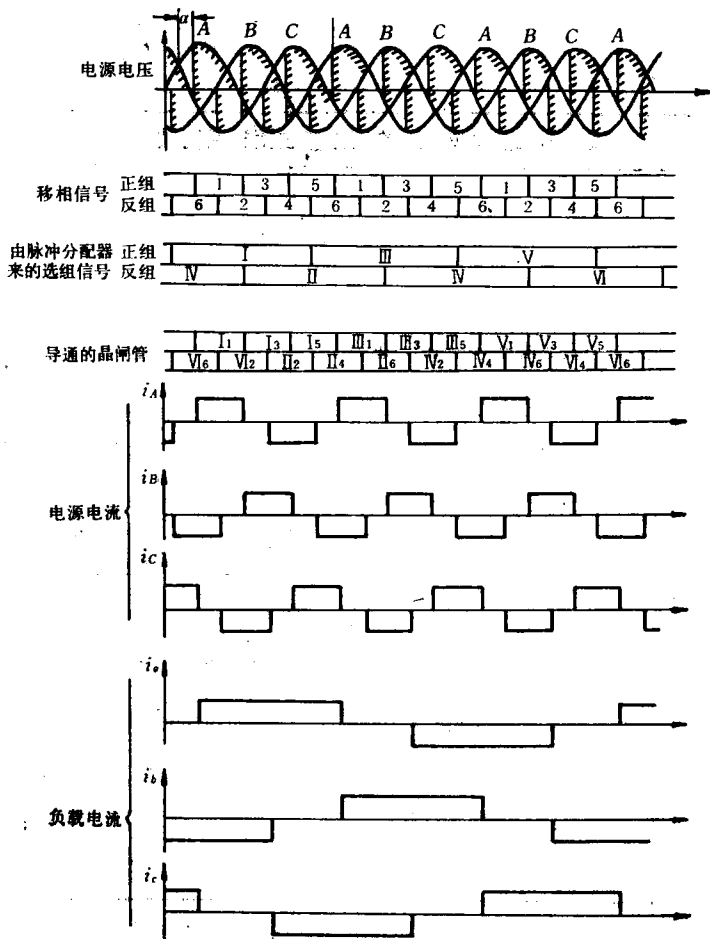


图 1-5 电流型交-交变频器电流波形

图1-5为输出频率为电源频率 $1/3$ 时,晶闸管导通的次序和电源电流、负载电流的波形。假定滤波电感足够大,则电流可以看作是矩形波,它是一种电流型变频器。如果不接滤波电感器,而将两组整流器直接反并联,则可构成电压源型变频器。

由图1-5中可见,6组整流器I~Ⅵ依次各导电 120° ,因此,负载电流也为持续 120° 的方波,而每组桥的晶闸管,则按1~6的次序换流。

这种方波形交-交变频器供电的调速系统,可以在电源频率 $1/2$ 以下进行调速,控制并不太复杂。但是由于它的波形不好,在低速时脉动转矩较大,会导致电动机转速不均匀,而且方波带来的高次谐波使电动机的损耗及噪声增大,因此,在异步电动机调速系统中很少用,常用于无换向器电机及超同步串级调速系统中。

二、正弦型交-交变频器

图1-4方波型交-交变频器中,给定一个控制角 α ,则对应一个输出电压,如图1-6所示。

由于输出半个周期中各晶闸管导通情况相同,因此,在半个周期中平均电压 u_d 为一个固定的数值。是否可以使每组整流器的输出平均电压 u_d 随时间按正弦规律变化呢?由于 u_d 是由晶闸管的控制角 α 所决定的,所以,如果在半个周期中使控制角 α 由 $\pi/2$ (这时对应于 $u_d=0$)开始逐渐减小到0(这时对应于 u_d 为最大),然后逐渐增加到 $\pi/2$,亦即使 α 角在 $\pi/2 \sim 0$ 的范围内来回变化,则不难看出,整流器输出的平均电压将可按正弦规律变化。如图1-7所示。

从图1-7a可以看出,在A点 $\alpha=0$,正组(共阴组)平均电压 u_d 最大,逐渐增加 α 角则 u_d 相应减小。当在F点 $\alpha=\pi/2$ 时, $u_d=0$ 。半周期内平均输出电压 u_d 如图中虚线所示,为一正弦波,这个阶段整流电压上部所包的面积比下部的大,总的功率是由电源流向负载,故正组处于整流状态。

如果使控制角 α 在 $\pi/2 \sim \pi$ 之间变化,如图1-7b所示,即可使整流器输出平均电压为正弦波的负半波。由于在此阶段中,整流器电压上部所包围的面积比下部的小,总的功率是由负载流向电源,故正组处于逆变状态。

对于反组(共阳组)整流器的工作情况与正组整流器相似。当 $\alpha < \pi/2$ 时,反组是处于整流工作状态,但这时输出整流电压的极性正好与正组整流器状态相反,其波形为正组整流输出波形(图1-7a)的镜像,总的功率由电源流向负载;当 $\alpha > \pi/2$ 时,反组整流器处于逆变状态,输出电压波形正好是正组逆变状态时输出波形(图1-7b)的镜像,总的功率由负载流向电源。

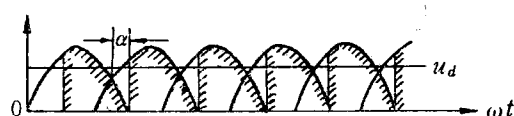
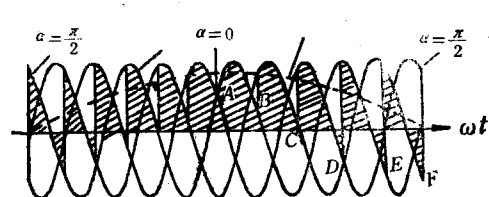
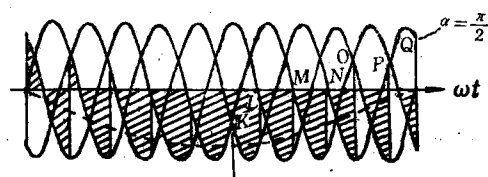


图 1-6 整流电路输出电压波形



(a) 正组整流状态



(b) 正组逆变状态

图 1-7 正弦型交-交变频器电压波形

由上述可知, 三相正弦波交-交变频器实质上是由三套两组反并联的可控整流器所组成, 它和直流可逆系统不同之处是 α 角需要不断调制, 使输出电压为正弦波, 以及六组整流器按其导通次序和规定输出频率不停地有序地切换, 因此, 下面讨论触发脉冲的调制与控制, 以及环流问题。

(一) 触发脉冲的调制与控制

实现交-交变频时, 首先应解决的一个实际问题是正确控制正反两组整流电路中各晶闸管的触发时间, 即 α 角, 以获得期望的输出电压波形。这实际上是要寻找一个合适的同步电压。

三相整流电路输出电流连续时, 输出电压平均值 U_d 为:

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha \quad (1-1)$$

式中 α ——晶闸管的控制角;

U_{d0} —— $\alpha = 0$ 时的整流平均电压。

在式(1-1)中, 令 $\alpha = \omega_1 t$, 并记 U_d 的瞬时值为 u_d , 则有

$$u_d = U_{d0} \cos \omega_1 t \quad (1-2)$$

式中 ω_1 ——电网电压角频率。

对应于图1-8中每只晶闸管的阳极电压 u_i ($i=1, 2, \dots, 6$), 都可作出一条由式(1-2)给出的余弦函数曲线, 其中与 u_1 对应的一条 u_{d1} (图1-8), u_{d1} 的最大值出现在 $\alpha = 0^\circ$ 处, 并在 $\alpha = 90^\circ$ 处过零。这条 u_{d1} 曲线显然代表在阳极电压 u_1 作用下第一只晶闸管导通期间内输出电压平均值 u_d 与控制角 $\alpha = \omega_1 t$ 之间的变化关系。因此, 若对于每一只晶闸管的阳极电压 u_i 均取类似的电压 u_{di} 作为同步电压 u_{si} , 即

$$u_{si} = u_{di} = u_{d0} \cos \omega_1 t \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (1-3)$$

并取与期望的交-交变频器输出电压的幅值和频率均一致的余弦电压

$$u_c = U_{cm} \cos \omega_0 t \quad (1-4)$$

作控制电压, 如图1-9所示, 如果在 u_c 与 u_{si} ($i=1, 2, \dots, 6$)交点处触发相应相的晶闸管, 即以各相 $\alpha = 0$ 处至其相应的交点处的电角度 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_6$ 作为各相晶闸管的控制角, 则根据上述同步电压形成的方法可知, 此时整流器输出电压的大小与控制电压 u_c 相等, 换言之, 只要在图1-9中所示的 u_c 与 $u_{s1} \sim u_{s6}$ 的交点处产生对应晶闸管的触发脉冲, 那末, 交-交变频器的输出电压的表达式可由式(1-4)等号右侧部分给出, 其幅值和频率均可通过改变控制电压的幅值和频率的大小进行控制。显然, 若将 $u_{s1} \sim u_{s6}$ 和 u_c 的幅值按相同的比例缩小, 变频器输出电压幅值不变, 这样可以避免控制电压过高。

若希望获得三相变频电源, 则需三相对称的控制电压。但是, 要产生一个幅值和频率均连续可调的控制电压 u_c 并不容易, 产生三个相位上完全对称、幅值和频率都能在足够宽的范围内连续可调的三相控制电压就更困难。为了降低成本, 简化变频器的电路结构和提高工作的可靠性, 常常只能降低要求地利用三角波、锯齿波甚至方波电压来代替正弦控制电压。当

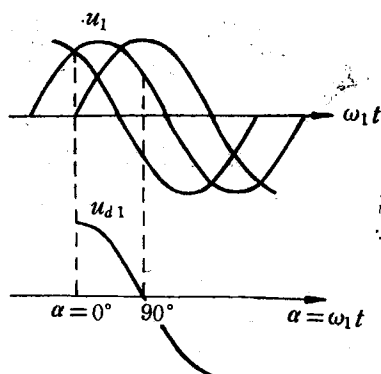


图1-8 同步电压的生成

然，这样将导致输出波形畸变，使电动机的运行性能变差。

(二) 环流问题

1. 交-交变频器的无环流运行方式

与直流可逆系统一样，当正组工作时，将反组封锁，反组工作时，将正组封锁，两个整流器之间就不会出现环流。

为了便于分析交-交变频器在无环流运行时的工作情况，假定输出电流是正弦波（实际上因为电压含有高次谐波，电流中也含有高次谐波）。负载滞后的功率因数角 $\varphi = 60^\circ$ ，其输出电压和电流的波形如图1-10所示。

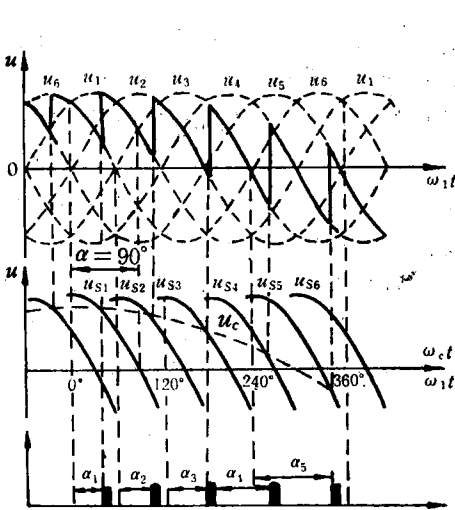


图 1-9 触发脉冲的控制

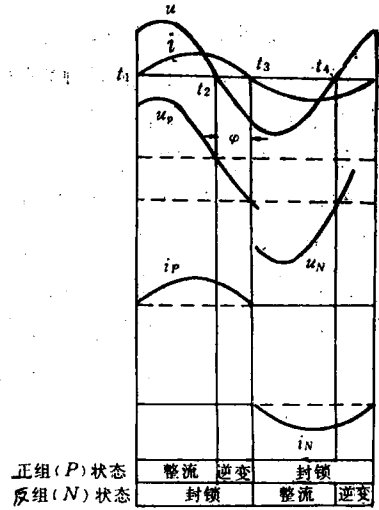


图 1-10 交-交变频器的工作状态与电流电压波形

从图1-10可以看出，由于整流器的单向导电性，在负载电流的正半周（ $t_1 \sim t_2$ ）阶段，只能由正组整流器流过电流 i ，反组被封锁。这时输出电压极性为正，故正组处于整流状态。在（ $t_2 \sim t_3$ ）阶段，负载电流 i 的方向未改变，故仍为正组工作，但输出电压 u 的方向却已变负，故这时正组应处于逆变状态。在 t_3 时刻以后，负载电流反向，故封锁正组，反组投入工作，在（ $t_3 \sim t_4$ ）阶段由于输出电压和电流均为负，故反组处于整流状态。在（ $t_4 \sim t_5$ ）阶段，电流方向虽未变，但输出电压已反向，故反组应处于逆变状态。对应其它不同相位角的负载，读者可依次类推。

由上述分析不难看出，决定由哪一组整流器导通和该组输出电压的极性无关，而是由电流的方向所决定的。至于导通的整流器是处于整流状态还是逆变状态，则视该组输出电压与电流的极性是相同还是相反而定。同时也可以看出，一个周期中输出电压的波形，实际上是由图1-7中正组和反组的那四种状态“装配”而成的。

应该指出，在负载电流过零进行换组之际，应有一段两组整流器全被封锁的时间，以保证可靠的换流，否则晶闸管的关断时间不足，导致电源的直通。此外，实际的负载电流中含有高次谐波，而且在无环流运行方式中，负载电流过零时常常是不连续的。这样不仅输出电压畸变，而且还给选组的控制带来了困难，因为这时就不能不加选择地将任一电流过零点作为选组的逻辑条件。

2 交-交变频器的有环流运行方式

和直流可逆系统一样，我们可以同时将触发脉冲加在两组整流器上，并且保持正反两组整流器每一瞬间输出电压的平均值相等，极性相反，则两组整流器之间不会出现与输出电压频率相同的低频环流。但由于两组整流器输出电压的瞬时值不等，其间仍有频率较高的环流出现，这种运行方式称为有环流运行方式。为限制环流的大小，可以在电路中串入适当大小的限流电抗。与直流可逆系统不同的是：由于输出电流本身也是交流，同样受限流电抗的影响，故串入的电抗值应比同容量直流可逆系统的限流电抗值小。这种运行方式的优点是能保证正反两组整流器在切换过程中电流连续，使系统具有良好的动态性能，这一点与直流可逆系统是一致的。

由于交-交变频器正反两组整流器经常处于切换状态中，采用完全无环流的运行方式会造成负载电流过零时出现波形畸变和电流断续现象，影响电动机的运行性能，如果采用完全有环流的运行方式，动态性能虽好，但需用较大的限流电抗器，而且经常的环流是不利的。因此，提出了局部环流运行方式：在正反组切换前的一段时间内令系统按有环流方式工作，即当正组向反组切换时，在负载电流下降到零之前提前解除对反组的封锁，而正组则待电流反向并达到一定数值后才进入封锁状态，保证负载电流在过零前后正反两组有一段重叠工作期，在此期间系统处在有环流状态下运行。由反组向正组切换时的过程与此相同。这种局部有环流运行方式，对限流电抗器的尺寸要求不大，因为它根据较小的负载电流来设计的，但却能消除环流的不利影响，又能保证得到满意的输出电流，提高系统的动态性能。

第二章 交-直-交电压源型变频器

交-直-交电压源型变频器广泛应用于电力拖动系统,高精度稳压稳频电源和不停电电源(UPS)。这种变频器由整流器和逆变器两部分组成,在逆变器的直流电源侧并有大电容,用来缓冲无功功率。逆变器一般包括逆变电路和换流电路两部分。异步电动机定子变频调速系统中用的逆变器通常是三相桥式逆变电路,根据其工作方式的不同,一般又可分为 120° 导电型和 180° 导电型。换流电路是逆变器的核心部分,它对变频装置的造价、体积、力能指标、工作可靠性等方面起决定性的作用,特别是电压源型逆变器,换流技术较为复杂,线路及设计原则各异,因此,人们往往根据逆变器中的换流电路形式来命名逆变器。电压源型逆变器的换流电路形式繁多,常用的有串联电感式、晶闸管换流式以及串联二极管式等几种类型,每种类型又各有许多派生的电路。本节主要研究这些逆变器的电路组成、工作原理、换流过程以及相关元件的选择等。

为了便于分析各类逆变器的工作原理,特别预先提出了下面几点理想化的假想:

1. 逆变器交流输出的周期比晶闸管的关断时间长得多,即 $T \gg t_q$;
2. 负载电感比换流电感大得多,因此,可以认为负载电流在整个换流期间近似为一个恒定值,这实际上是能满足的;
3. 直流电源为理想的电压源,内阻抗为零;
4. 忽略晶闸管的开关时间和关断晶闸管的反向电流;
5. 忽略线路中元件的损耗;
6. 不计晶闸管与二极管的正向电压降。

§ 2-1 串联电感式逆变器

图2-1为三相串联电感式逆变器电路,属 180° 导电型,换流电路为串联电感式。这是一种较为常用的电路,其结构简单,性能良好,广泛用于中、小功率或频率不高的变频系统。图中 $V_1 \sim V_6$ 为主晶闸管, C_d 为滤波电容器, $C_1 \sim C_6$ 为换流电容器, $L_1 \sim L_6$ 为换流串联电感, $V_{11} \sim V_{16}$ 为反馈二极管, R_A, R_B, R_C 为衰减电阻, Z_A, Z_B, Z_C 为三相负载阻抗。

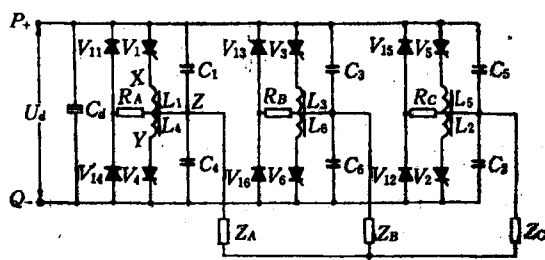


图2-1 三相串联电感式逆变器

一、换流原理

在变频调速系统中,逆变器通常都是以异步电动机为负载,它是一种电感性负载,因此,需要强迫换流,下面就来讨论这种电感性负载的换流过程。当负载为电容性时,逆变器则可采用负载换流方式,而不必设置强迫换流电路,因此,下面不讨论电容性负载的换流过程。