

73.253
292

电子逆变技术及 交流电动机调速系统

何冠英 编著

机械工业出版社

本书比较系统地介绍了目前受到国内外普遍重视并具有广阔发展前途的高性能交流电动机调速技术（包括变频调速、无换向器电动机调速和串级调速）。书中着重叙述了各调速系统的基本概念、主要技术问题、理论分析、工程实用线路方案、工程计算方法、交流调速的新技术及其发展趋势等。为了便于读者掌握，书中还附有经过工程实践考验的计算实例。

本书可供从事交流电动机调速技术的科研、设计和应用的工程技术人员阅读，也可供大专院校有关专业师生参考。

电子逆变技术及交流电动机调速系统

何冠英 编著

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $14^{1/4}$ · 字数 372 千字

1985年12月北京第一版·1985年12月北京第一次印刷

印数 0,001—4,100 · 定价 4.10 元

*

统一书号：15033·5862

目 录

前言

主要符号说明

第一章 逆变器与现代电气传动装置	1
第一节 电气传动的发展历史及电子逆变器的地位	1
第二节 直流电动机的调速方案	4
第三节 交流电动机的调速方案	5
第四节 高性能交流调速传动及其主要技术问题	7
第二章 电子逆变技术	13
第一节 基本概念	13
第二节 电源电压换流	22
第三节 负载换流	23
第四节 强迫换流	33
第五节 用强迫换流方法改善变流器的功率因数	45
第三章 独立控制频率调节(变频)的一般问题	48
第一节 概述	48
第二节 异步电动机的变频调速特性	49
第三节 变频装置的分类	55
第四章 交-交独立控制变频系统	59
第一节 交-交电压型变频系统	59
第二节 交-交电流型变频系统	70
第三节 交-交电压型变频系统的差频控制	77
第五章 电压型独立控制逆变器强迫换流线路的理论分析及 计算方法	83
第一节 串联电感式换流线路	85
第二节 带公用换流环节的换流线路	105
第三节 电感储能式换流线路	109

VI

第四节	辅助可控硅换流线路〔麦克墨菜 (McMurray) 逆变器〕.....	129
第五节	串联整流器式 (反馈整流器曲折联结) 换流线路	135
第六节	换流线路选择的一般原则	156
第七节	几种常用的三相电压型逆变线路的简单介绍	159
第六章	交-直-交电压型独立控制变频器	163
第一节	简单的三相六脉波逆变器	163
第二节	直流滤波回路参数的计算及选择	170
第三节	电压调节方法	179
第四节	电压型逆变器的效率	199
第五节	谐波分析及逆变器输出波形的改善	203
第七章	交-直-交电流型独立控制变频器	223
第一节	三相六脉波电流型变频器的分析	223
第二节	电容补偿自然换流电流型变频器	227
第三节	常用串联整流器式电流型逆变器	229
第四节	带辅助可控硅元件的电流型逆变器的波形分析	250
第五节	滤波电抗器的选择	253
第六节	转矩脉动的抑制方法	256
第八章	独立控制变频器-异步电动机传动系统	266
第一节	专用的主要控制环节	267
第二节	转速开环、电压闭环系统	275
第三节	转差频率控制转速闭环系统	283
第四节	其他几种变频传动控制系统	294
第九章	异步电动机矢量变换控制系统	298
第一节	矢量变换控制的基本概念	298
第二节	异步电动机的矢量坐标变换	300
第三节	异步电动机的基本方程	305
第四节	转子磁通的测量	308
第五节	定子电流沿转子磁通轴的分解	312
第六节	矢量变换控制系统	313
第十章	自同步控制频率调节 (无换向器电动机) 传动系统	321
第一节	基本工作原理	321

第二节	交-直-交电流型无换向器电动机	333
第三节	交-交电流型无换向器电动机	346
第四节	交-交电压型无换向器电动机	353
第五节	无换向器电动机的短时过载能力	353
第六节	无换向器电动机的几种结构形式	356
第七节	转矩脉动的抑制方法	357
第八节	特殊用途	359
第九节	无换向器电动机传动系统	361
第十一章	绕线转子异步电动机能量双馈转差调节 (串级 调速) 传动系统	388
第一节	基本概念及特点	388
第二节	次同步串级调速装置	395
第三节	次同步串级调速传动系统	418
第四节	超同步串级调速传动系统	426
第五节	串级调速系统的一些特殊接线方式	429
第十二章	高性能交流电动机调速系统的适用范围及发 展趋势	431
第一节	适用范围	431
第二节	发展趋势	435
参考文献		439

第一章 逆变器与现代电气传动装置

第一节 电气传动的发展历史及电子 逆变器的地位

电气传动一般按电能-机械能的转换装置（电动机）的不同可分为交流传动和直流传动两大类。

从电能的控制方式来说，交流传动是以交流电的形式作为功率源输入到电动机的端子，借以形成旋转磁场或按一定规律改变电流的流向，以产生所需的连续转矩及转速。而在直流传动中，则以直流电的形式作为功率源输入到电动机的端子，为了使电动机在旋转过程中产生连续的转矩和转速，所需电流流向的改变是靠机械式换向器（习称整流子）来实现的。在交流传动中，交流换向器电动机是采用机械式换向器进行转差能量反馈的一种特殊调速电动机，除此之外，其余交流传动用的主电动机都没有机械式换向器。所以交流传动一般又统称为无换向器传动。

电气传动的发展，一方面，取决于电磁理论、电能的输送与分配、电机制造工艺、控制理论、生产技术等的发展；另一方面，在很大程度上依赖于电能变换手段（即整流与逆变控制）的解决程度。最早的电气传动出现在十九世纪三十年代，是以蓄电池为能源的直流传动；后来发展为直流发电机供电；一直到十九世纪八十年代，直流传动仍是唯一的电气传动方式。当时由于输配电等问题解决得不好，所以其应用面不广。十九世纪末，出现了交流电，特别是出现了三相制供电系统，解决了输配电的问题，也制成了基于旋转磁场理论的简单、经济、牢固的笼型异步电动机，这就使电气传动发展到一个新的阶段，使采用笼型电机的交流传动在工业中得到广泛应用，开辟了电气传动的新局面。此后，从总的电气传动领域中来看，交流传动一直占有主要的地位，它被

大量地应用在不调速的场合。

随着生产技术的发展,对电气传动提出了自动地起动、制动、正反转和平滑调速的要求。直流电动机由于它有灵活的可逆特性以及良好的调速性能而崭露头角。长期以来,在调速领域中,直流传动一直占主导地位。它从电动机-发电机组供电,经过离子变流装置供电,一直发展到后来的可控硅变流装置供电。前者由机械式换向器进行整流及逆变,后两者则由静止式变流装置进行整流及逆变。与快速的控制环节相配合,静止式变流装置,尤其是采用可控硅变流装置,可以得到比机组优越得多的性能,它使直流传动发展到一个前所未有的新水平。

但是,尽管如此,静止式变流装置只解决了直流传动换向问题的一半(即仅解决了供电部分的整流及逆变控制)。直流电动机本身的机械换向问题却影响着其传动系统的进一步发展。同时,在一些特殊要求(如特殊环境要求)的场合,直流传动无法应用。

早在本世纪三十年代,不少国家就提出了各种交流调速传动的原始线路,谋求解决在调速性能上能与直流传动相媲美的交流调速传动问题。四十年代初出现了无换向器电动机的试验装置^[1-1],四十年代中,以汞弧整流器作为变流元件的串级调速装置投入了工业运行^[1-2],五十年代,国内外都在试验室中进行由采用闸流管的三相逆变器供电的异步电动机调速传动的试验^[1-3]。但是,交流调速的发展受其物质基础——静止式变流器件以及相应的电子逆变技术的限制,在可控硅元件以及相应的电子控制器件问世以前,上述装置都未能得到推广应用,有的甚至未能走出试验室。自从可控硅元件出现以来,短短的一、二十年时间内,交流调速传动的发展就出现了一个飞跃,特别是微电子技术的发展,保证了复杂系统的可靠性。在国外,六十年代后期,基本上解决了交流调速传动在工业中应用的关键技术问题,七十年代则走上了扩大应用,系列化,进一步提高性能指标以及向高压、大容量、小型化发展的新阶段。从而,它已成为直流调速传动的一个重要补充部分。

随着工农业生产、国防和科学技术的进一步发展，对电气传动提出了一系列新的要求，为此，除了进一步解决具有机械换向器的直流电动机传动的技术问题外（目前直流调速仍占主导地位），就要运用电子逆变技术来发展无换向器的调速传动。目前，直流电动机在单机容量、电压等级和提高转速等方面已渐趋于极限。例如，目前，直流电动机的单机容量只能达到12000和14000kW，分别制成三电枢和双电枢的形式。而交流同步电动机和异步电动机的单机容量都可以远远高于此值；由于换向器的限制，直流电动机的最高电压只能达到1000多伏，而交流电动机则很容易做成6、10kV或更高；由于机械强度等问题，除微电机以外，直流电动机的最高转速只能达3000rpm左右，而交流电动机则可高达每分钟数万转或更高。在能源紧缺的今天，对原有大量采用不调速交流传动的风机、水泵等设备进行技术改造，也是当前交流调速的一个重要应用领域。此外，目前某些场合对缩小电动机的体积、重量和减少维护、节省运行费用等方面要求的呼声也很高，而这些都是直流传动的薄弱环节。为此，某些国家提出了“以交流传动代替直流传动”的设想，从目前交流调速传动的水平及发展速度来看，从大功率电子元件及电子逆变技术的发展情况来看，这种提法，虽一时不太现实，但如果是说，使交流调速传动在较广的领域内能和当前的直流传动相比，则不是完全没有可能的。如果一旦它能实现，必将给电工技术带来新的面貌。

当然，推广交流调速传动的难度是较大的。例如，它的造价较高、效率较低等问题有待于克服，有许多理论和实际问题有待于解决等等。正是由于一方面有广阔的前景，另一方面还存在较多的技术问题，所以近年来，交流调速传动在国外得到了普遍的重视。不少国际电工、电子技术和自动化等学术会议，都把交流调速传动作为一个重要的议题。例如，1977年在苏联莫斯科召开的世界第十一届电工会议上，有关电气传动新的发展方向，首先提到的是可控硅变频的同步电机、异步电机传动及无换向器电动

机^[1-4]。1977年在美国佛罗里达召开的国际大功率半导体变换装置会议上，交流调速传动技术的研究及动向也是会议的中心议题，18篇有关电气传动的文章中，有关交流传动的占了14篇^[1-5]。

在国内，采用电子逆变器的交流调速传动也曾一度引起不少人的重视。但是，一方面受到电子器件发展水平的限制，另一方面也由于不能恰当地看待交流调速传动，片面地、过早地把它提到不适当的地位，更重要的是没有重视交流调速传动基本理论（最根本的是电子逆变技术）的研究，而是急于求成，致使我国在这方面的的工作进展缓慢。

根据我国的具体情况，如铜和云母蕴藏量不丰富，直流电机制造能力不足，某些旧的生产设备要进行技术改造，运用电子逆变技术发展高性能的交流调速传动是非常必要的。

回顾电气传动的发展历史，比较下面两节中所列各种调速方案，可以看出电子逆变器在电气传动领域中具有重要的地位。

第二节 直流电动机的调速方案

直流电动机的转速 n 为

$$n = \frac{U - IR}{C_e \phi} \quad (\text{rpm})$$

式中 U ——电动机电枢电压(V)；

I ——电动机电枢电流(A)；

R ——电枢回路电阻（包括串接电阻）(Ω)；

$C_e \phi$ ——转速系数(V/rpm)，其中 ϕ 为电动机的磁通。

因此，直流电动机有三种基本调速方案：

(1) 调节电枢回路电阻 R ；

(2) 调节电枢电压 U ；

(3) 调节电动机磁通 ϕ 。

常用的直流电动机调速方案、主要性能特点以及是否采用电子逆变技术，如表 1-1 所示。

表1-1 常用直流电动机的调速方案

类别	具体调速方案	电动机类型	主要性能及特点	是否采用电子逆变技术
调节电阻		他励或复励机，串励机	简单，有级调速，恒转矩，效率低	不采用
调节电压	变流机组供电	他励机	无级调速，恒转矩，动态响应较慢，效率较低	不采用
	可控硅变流装置供电	他励机	无级调速，恒转矩，动态响应快，效率较高，深控时功率因数低	采用
	斩波器(直流变直流)	他励或串励机	无级调速，恒转矩，效率较高，功率因数高	采用
调节磁通(调节励磁电流)		并励或他励机	无级调速，恒功率，动态响应及效率视供电电源及励磁系统采用机组或可控硅变流装置而定	不定

第三节 交流电动机的调速方案

不少文献是按电动机的类型来进行交流调速基本方案分类的，但是，如果按电能控制的方式来分类，或按交流电动机的转速公式来分类，则显得更为合理而简明，也有利于其技术特点的讨论。

交流电动机的转速公式为

$$n = \frac{60f}{p}(1-s) \quad (\text{rpm})$$

式中 f ——供电频率(Hz)；

p ——极对数；

s ——转差率(同步电机时， $s = 0$)。

因此交流电动机有三种基本调速方案：

(1) 调节频率 f ；

表1-2 常用交流电动机的调速方案

类别	具体调节方案		电动机类型	主要性能及特点	是否采用电子逆变技术
调节频率	独立控制频率调节 (变频调速)		同步机 异步机(一般为笼型)	无级调速, 恒转矩, 效率较高	采用(早期用变频机组供电, 性能差)
	自同步控制频率调节(无换向器电动机)		同步机(特殊结构)	无级调速, 恒转矩, 效率较高	采用
调节转差率	异步电动机双馈转差调节	次同步串级调速	绕线转子异步机	无级调速, 恒转矩, 调速范围较小, 无制动转矩, 效率较高, 功率因数较低	采用(早期用电机进行能量反馈, 性能较差)
		超同步串级调速	绕线转子异步机	无级调速, 恒转矩, 调速范围可扩大, 能产生制动转矩, 效率较高, 功率因数较次同步串级调速为高	采用
		交流换向器电动机调速	交流换向器电机	无级调速, 恒转矩, 精度差, 维护麻烦	不采用
	能耗转差调节	转子串电阻调速	绕线转子异步机	简单, 有级调速, 特性软, 效率低	不采用
		电磁转差离合器调速	异步机+电磁转差离合器	无级调速, 恒转矩, 无制动转矩, 效率低	不采用
		定子电压调节(调压调速)	异步机(一般为绕线转子型, 小容量可用特殊笼型)	无级调速, 恒转矩, 效率低	不采用
调节极对数	变极调速		变极电机	简单, 有级调速, 恒转矩或恒功率	不采用

(2) 调节转差率 s ;

(3) 调节极对数 P 。

常用的交流电动机调速方案、主要性能特点以及是否采用电子逆变技术,如表 1-2 所示。

应该注意,独立控制频率调节(变频调速)与自同步控制频率调节(无换向器电动机)之间的根本差别在于变流器对电动机绕组电流(或电压)进行切换的控制方式(前者由外加的振荡器来控制,后者则由转子的位置来决定),而不在于是否是同步运转(无换向器电动机是同步运转的,但变频调速当采用同步机时也是同步运转的,但前者无失步问题,后者则有异步加速运转或是失步的可能),也不在于是否采用负载换流方式(变频调速也可采用负载换流方式,低频正弦波电压型无换向器电动机则不是采用负载换流方式,而是采用电源电压换流方式),从而形成各自的技术特点及某些相似之处,详细技术问题将在以后的有关章节中叙述。

表中所列串级调速的调速范围较小,这是从经济角度(即所需变流装置容量)出发。在技术上,串级调速范围也可很宽,但此时所需变流装置容量较大,这样就会失去串级调速所特有的小范围调速的经济性。

第四节 高性能交流调速传动及其主要技术问题

由表 1-1 及表 1-2 可见,现代电气传动离不开电子逆变技术。不采用电子逆变技术的交流调速方案,虽然技术上比较简单,但其效率及调速性能较差,因此,在应用上有局限性。而采用电子逆变技术的交流调速方案,都具有高的效率,宽的调速范围和平滑调节特性,同时还能获得优良的静态及动态特性,从而能与直流调速相比较。这一类采用电子逆变技术的交流调速方案,可称之为高性能的交流调速方案,以便与一般的交流调速方案相区别。

大功率电子逆变器是实现高性能交流调速传动的基础,它是

今后电气传动发展的主要研究课题。

典型的高性能交流调速传动的功率回路简图如图1-1~图1-3所示。

图中电子功率变换部分用点划线框出。可见，在由交流电网供电的情况下，不管何种调速方案，其功率变换部分的两端都各自联系着两个不同的电源，一端是恒频恒压电源(电网)，另一端是变频变压电源(电动机)。为了能够实现电动及再生运行，以获得较好的动态特性，并能实现平滑调速，要求变流器电能的流向能够任意地改变，即变流器既能工作在整流状态，又能工作在逆变状态，电机侧变流器的频率及电压(或电流)能根据不同要求任意控制。由此而带来的高性能交流调速传动的主要技术问题可归结为下面几个主要方面^[1-6]。这也是本书所要讨论的中心议题。

1. 功率变换问题(换流问题)

目前功率变换器绝大部分采用属于半可控型开关元件的可控硅整流器(全控型的开关元件如功率晶体管,可关断可控硅元件等的应用尚较少,特别是国内的情况如此)。为了使功率变流器能可靠地换流,要求与它连接的交流电源能提供必要的容性电流,或在变流器内部采用专门的换流线路使元件强迫关断,前者称之为自然换流,后者称之为强迫换流。电网侧变流器(或交-交变频线路)可采用自然换流方式,其结果是使电网的功率因数恶化,大容量装置则必须采用功率因数补偿装置。电机侧变流器可以采用自然换流或强迫换流方式,前者如无换向器电动机,它相当于同步电机工作在过励状态,因此,可以为变流器提供必要的容性电流(当然这必须增加电动机的励磁容量),也可以对异步电动机或其他型式的具有滞后功率因数的电动机,用电容器进行过补偿,而使变流器实现自然换流,但这是昂贵而又有局限性的,故异步电动机变频调速的逆变器都采用强迫换流方式。强迫换流对所用可控硅元件有较高的要求,同时线路复杂,使可控硅元件的电压及电流利用率下降,装置的效率也降低。全控型开关元件的发展,有助于解决这一问题。功率变换部分对交流调速的功能指标、造

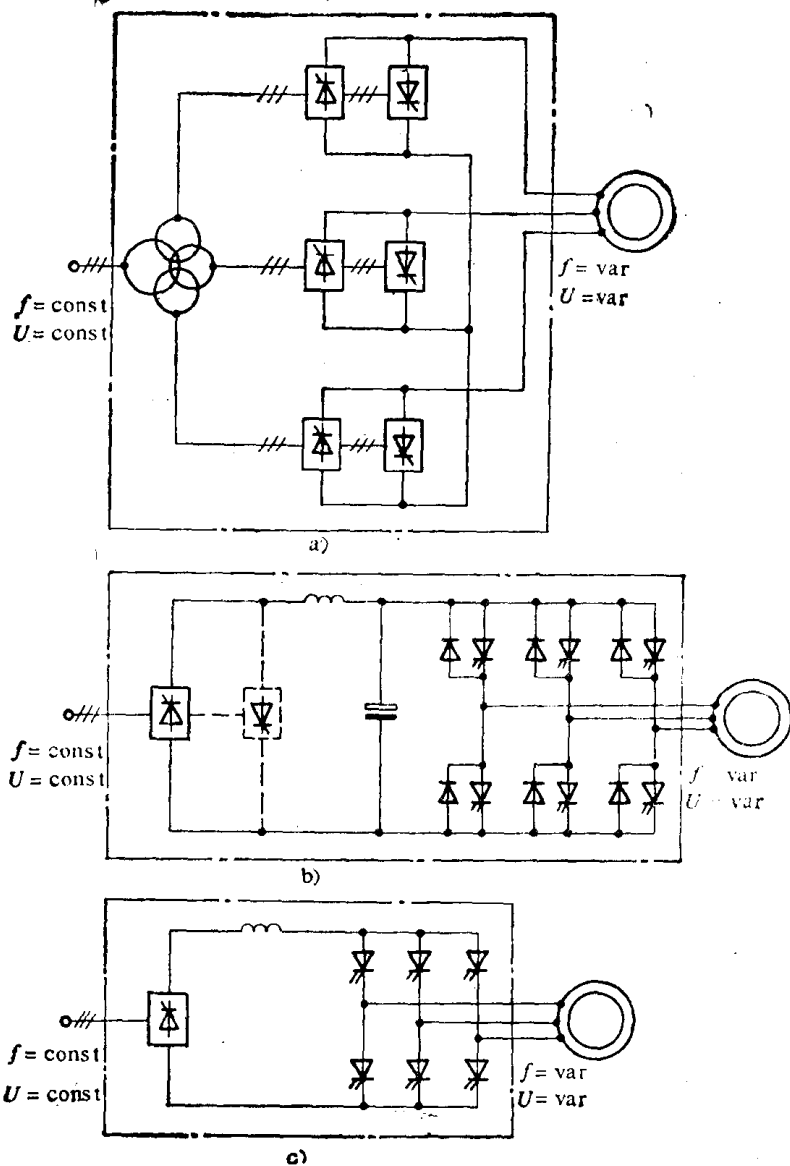


图1-1 变频调速功率回路简图

a) 交-交电压型 b) 交-直-交电压型 c) 交-直-交电流型

const—常量 var—变量

注：图中带两根门极线的可控硅元件图形符号，表示该可控硅元件是带强迫关断线路的（也可以采用全控型开关元件来代替）。

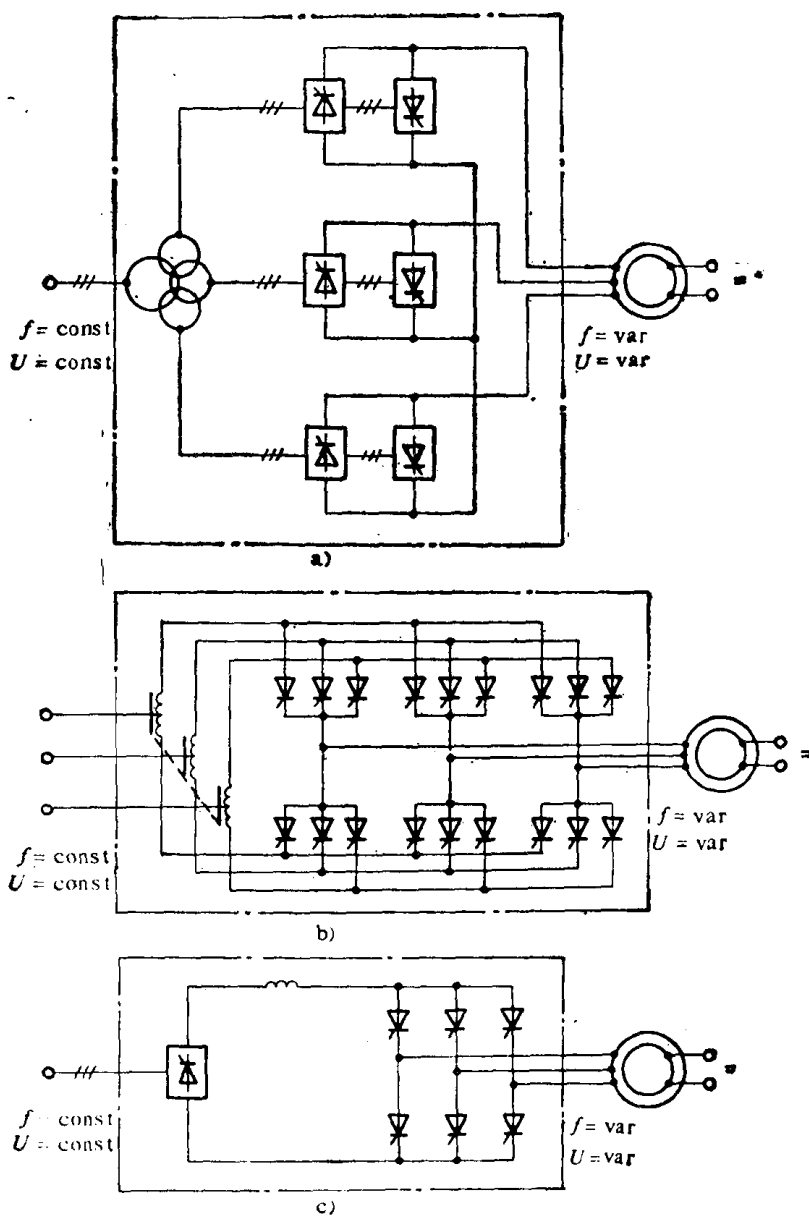


图1-2 无换向器电动机功率回路简图

a) 交-交电压型 b) 交-交电流型 c) 交-直-交电流型

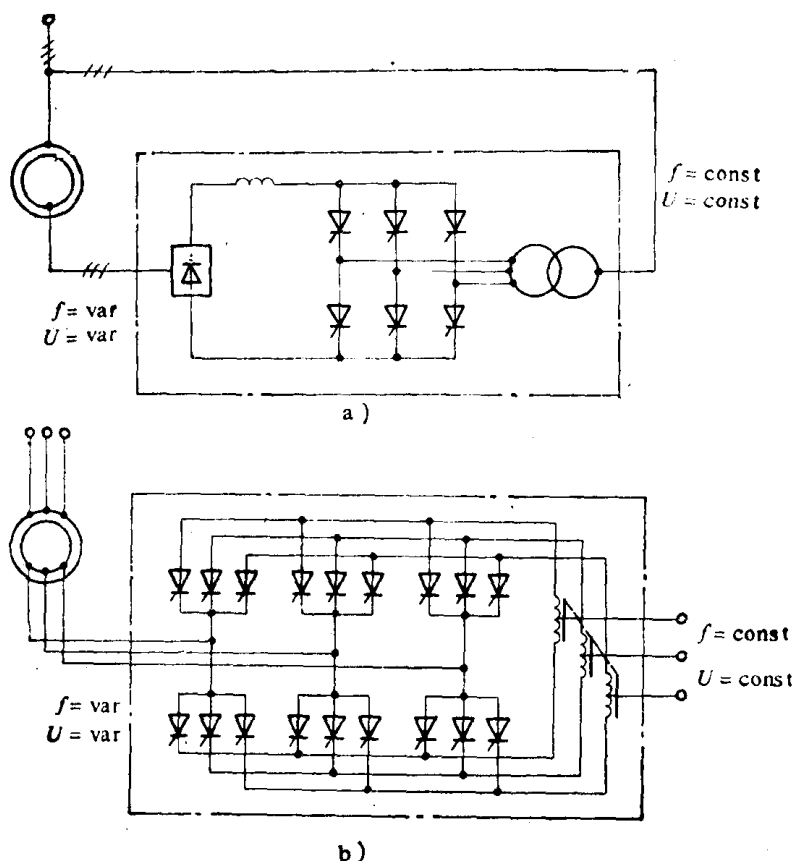


图1-3 串级调速功率回路简图

- a) 交-直-交流型异步串级, 如欲超同步, 则电机侧整流元件需改用可控元件 b) 交-交流型超同步串级

价等起决定性作用, 是长期以来研究的重点。

2. 高次谐波引起的损耗及转矩脉动问题

考虑到装置的效率, 除小功率以外, 变流器只能采用开关元件, 或使线性元件工作在开关状态 (如功率晶体管) 而不工作在线性状态。因此, 变流器从电网中吸取的电流远非是正弦波的, 而是矩形波或阶梯波的, 其中, 除了基波分量以外, 还含有大量高次谐波, 它使电网损耗增加, 并使电网电压波形发生畸变。这是变流器传动, 包括变流器供电的直流传动在内的共性问题。除此

之外，交流调速传动突出的问题更在于它给传动电动机提供含有高次谐波的电压和电流，导致电动机发热增加，出力减小，某些谐波还会产生负转矩，恶化其机械特性。高次谐波还会引起电动机的转矩脉动，在低速时影响更大，有的甚至会引起整个传动系统的机械共振。为此，发展了电压和电流的多重叠加、脉冲宽度调制（PWM——Pulse Width Modulation）等技术，用以解决这一问题。

3. 控制上的特殊问题

与直流调速传动相比，高性能交流调速传动的控制问题要复杂得多，其原因在于对交流电动机特性的描述及对交流量的控制较为困难。

（1）对于目前常用的标量控制，直流电动机的数学模型较为简单，而交流电动机，特别是异步电动机则相当复杂，许多参量相互制约，同时又受高次谐波及磁路饱和的影响，欲采用近似的简单方法对系统进行动态及稳定性的分析，往往不易得到象直流调速那样较为理想的结果。

（2）高性能交流调速传动中，功率变换器的输出为交流量，另外，交流电动机的电磁关系比较复杂。对同步电机而言，其电枢反应的影响较大（包括纵轴及横轴方向），不能象直流电动机那样可以比较充分地补偿，从而能分别地对电枢电流及励磁电流进行调节。对于异步机，磁场电流与产生转矩的有效电流（相当于直流电动机的电枢电流）同时由定子绕组提供，它们相互产生影响，采用一般方法在调节过程中无法将它们分开。因此，对于交流电动机，若采用一般的标量控制方法（例如对频率、电流或电压的量值进行控制），就不可能使系统在动态过程中始终处在最佳的条件下工作，而是必须采用对交流量的量值及相位同时进行控制的方法，这就是所谓矢量控制方法，它是高性能交流调速传动的特殊控制问题。

对交流电动机本身进行研究，也是高性能交流调速的另一个重要方面，但它已超出本书的范围，故不作深入讨论。