

技师学院维修电工专业教材
维修电工技师培训教材



变频变流 技术



中国劳动社会保障出版社

WEIXIU DIANGONG

技师学院维修电工专业教材
维修电工技师培训教材

变频变流技术

劳动和社会保障部教材办公室组织编写

中国劳动社会保障出版社

图书在版编目(CIP)数据

变频变流技术/王兆晶主编. —北京: 中国劳动社会保障出版社, 2006

技师学院维修电工专业教材

维修电工技师培训教材

ISBN 7 - 5045 - 5602 - 5

I. 变… II. 王… III. 变频器 - 教材 IV. TN773

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 031085 号

中国劳动社会保障出版社出版发行

(北京市惠新东街 1 号 邮政编码: 100029)

出 版 人: 张梦欣

*

新华书店经销

国防工业出版社印刷厂印刷 北京顺义河庄装订厂装订

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 7.5 印张 184 千字

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 1 次印刷

定价: 13.00 元

读者服务部电话: 010 - 64929211

发行部电话: 010 - 64927085

出版社网址: <http://www.class.com.cn>

版权专有 侵权必究

举报电话: 010 - 64911344

前 言

进入 21 世纪以来,我国作为制造业大国的地位和当前生产一线劳动者素质偏低及技能人才,尤其是高级技工、技师人才匮乏之间的矛盾越来越突出,已成为制约我国制造业升级的突出问题。为了解决这一矛盾,2005 年国务院颁布了《国务院关于大力发展职业教育的决定》,确立了“力争用 5 年时间,在全国新培养 190 万名技师和高级技师,新培养 700 万名高级技工,并带动中级和初级技能劳动者队伍梯次发展”的目标。正是在这样的新形势下,为了推进我国职业教育建设,加强各类高素质高技能专门人才的培养,我们组织编写了这套技师学院维修电工专业教材,初步完成的有《变频变流技术》《自动检测与传感器应用》和《PLC 原理与应用》3 种,之后我们还将陆续开发其他教材。

在这套教材的编写过程中,我们始终坚持了以下基本原则:

一是从生产实际出发,合理安排教材的知识和技能结构,突出技能培养,摒弃“繁难偏旧”的理论知识。二是以国家相关职业标准为依据,确保在知识内容和技能水平上符合国家职业鉴定技术标准。三是引入新技术、新工艺的内容,反映行业的新标准、新趋势,淘汰陈旧过时的技术,拓宽专业技术人员的知识眼界。四是在结构安排和表达方式上,强调由浅入深,循序渐进,力求做到图文并茂。

本套教材可作为技师学院维修电工专业教材,也可作为维修电工技师培训教材。

本套教材的编写工作得到了山东、广东等省有关学校的支持和帮助,在此我们表示衷心的感谢。

《变频变流技术》的主要内容包括:通用变频器的工作原理,变频器的参数设定和功能选择,变频器的安装、调试与维护,通用变频器应用实例,通用变频器技能实训等。

本书由王兆晶主编,刘传顺、尹四倍、马坤参加编写。

劳动保障部教材办公室

2006 年 6 月

目 录

绪论	(1)
第一章 通用变频器的工作原理	(4)
§ 1—1 通用变频器的基本工作原理	(4)
§ 1—2 通用变频器的结构原理	(7)
§ 1—3 通用变频器的控制电路原理	(17)
§ 1—4 高压变频器主电路结构及其控制特点	(28)
思考题	(37)
第二章 变频器的参数设定和功能选择	(38)
§ 2—1 变频器参数的设定	(38)
§ 2—2 变频器的启动和制动	(40)
§ 2—3 PID 调节功能预置	(42)
§ 2—4 变频器控制方式的选择与设定	(44)
§ 2—5 利用计算机设置变频器的参数和功能	(45)
思考题	(53)
第三章 变频器的安装、调试与维护	(54)
§ 3—1 变频器的安装与调试	(54)
§ 3—2 变频器的维护	(58)
思考题	(65)
第四章 通用变频器应用实例	(66)
§ 4—1 由变频器组成的调速系统	(66)
§ 4—2 变频器的外围设备及其选择	(72)
§ 4—3 变频器在恒压供水方面的应用	(76)
§ 4—4 变频器在运输机械中的应用	(80)
§ 4—5 变频器在龙门刨床上的应用	(86)

§ 4—6 变频器在生产线上的应用	(90)
§ 4—7 变频器在自动添加过程控制上的应用	(91)
思考题	(97)
第五章 通用变频器技能实训	(98)
实训 1 变频器的结构和功能预置	(98)
实训 2 变频器外部操作模式的运行	(109)
实训 3 电动机带负载实训	(111)

绪论

三、本课程的性质、任务和要求

1. 性质

它是数控类专业的主干课程，它综合了机械、控制原理、计算机技术、电力电子技术、电机与拖动基础、半导体变流技术等而形成一门专业基础课程。

2. 任务

变频器即电压频率变化器，是一种将固有频率的交流电转换成频率、电压可调的交流电，以供给电动机运转的电源装置。变频器外观如图 1 所示。

一、变频技术概述

随着电力电子器件制造技术、变流技术、控制技术、微型计算机技术和大规模集成电路技术的飞速发展，交流传动与控制技术成为目前发展最为迅速的技术之一。每当新一代的电力电子器件出现时，体积更小、功率更大的新型通用变频器就会产生；每当新的计算机控制技术出现时，功能更全、适应面更广和操作更加方便的一代新型通用变频器就会产生。

变频调速技术是当今节电、改善工艺流程以提高产品质量、改善环境、推动技术进步的一种主要手段。变频调速以其优异的调速、启动、制动性能，高效能、高功率因数的节电效果，广泛的适用范围以及其他许多优点，而被国内外公认为是有发展前途的调速方式。

二、通用变频器的发展过程和现状

自 20 世纪 80 年代初通用变频器问世以来，通用变频器更新换代了五次：模拟式通用变频器、数字式通用变频器、智能型通用变频器、多功能通用变频器和集中型通用变频器。

1. 通用变频器的应用范围

通用变频器在工业、家用电器等领域都得到了广泛的应用。其产品正在向三个方面发展，其一，向无须调整便能得到最佳运行效果的多功能与高性能型变频器方向发展；其二，向通过简单控制就能运行的操作方便的小型变频器方向发展；其三，向大容量、高启动转矩及具有环境保护功能的变频器方向发展。

2. 变频器使用的功率器件

变频器功率器件的发展如图 2 所示。

变频技术是建立在电力电子技术基础之上的。在低压交流电动机的传动控制中，应用最多的功率器件有 GTO，GTR，IGBT 以及智能模块（Intelligent Power Module），集 GTR 的低饱和电压特性和 MOSFET 的高频开关特性于一体的 GTR，IGBT 器件是目前通用变频器中广泛使用的主流功率器件。20 世纪 90 年代末还出现了一种新型半导体开关器件——集成门极换流晶闸管 IGCT（Integrated Gate Commutated Thyristor），该器件是 GTO 和 IGBT 取长补短的结果。总之，电力电子器件正朝着减少发热、高载波控制、提高开关频率、减少驱动功率的方向发展。

而 IPM 的投入应用比 IGBT 约晚两年，由于 IPM 包含了 IGBT 芯片及外围的驱动和保护电



图 1 变频器外观

思考题

第五章 通用变频器

实训1 变频器的结构

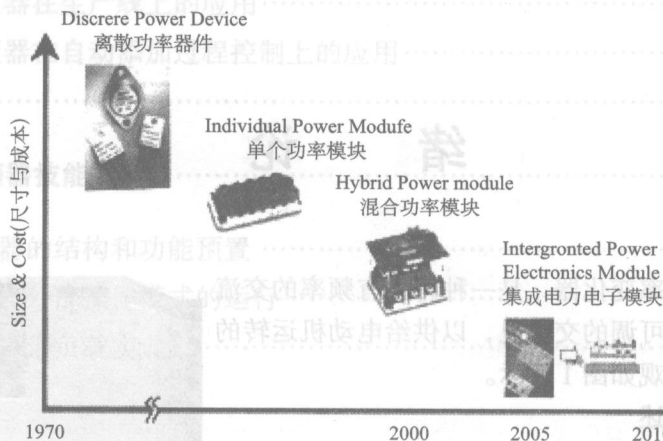


图2 变频器功率器件的发展

路，还有的把光耦也集成于一体，所以是一种更为好用的集成型功率器件。目前，在模块额定电流 10~600 A 范围内，通用变频器均有采用 IPM 的趋向。

3. 变频器的控制方式

早期通用变频器大多数为开环恒压比 ($U/f = \text{常数}$) 的控制方式，其优点是控制结构简单，成本较低，缺点是系统性能不高，比较适合应用在风机、水泵调速场合。具体来说，其控制曲线随着负载的变化而变化；转矩响应慢，电动机转矩利用率不高，低速时因定子电阻和逆变器死区效应的存在而使性能下降、稳定性变差等。对变频器 U/f 控制系统的改造主要经历了如下三个阶段。

第一阶段：20 世纪 80 年代初，日本学者提出了基本磁通轨迹的电压空间矢量（或称磁通轨迹法）。

第二阶段：矢量控制，也称磁场定向控制。它是 20 世纪 70 年代初由德国学者首先提出，以直流电动机和交流电动机比较的方法阐述了这一原理，由此开创了交流电动机和等效直流电动机控制的先河。

第三阶段：1985 年德国鲁尔大学一位教授首先提出直接转矩控制理论（Direct Torque Control，简称 DTC）。直接转矩控制与矢量控制不同，它不是通过控制电流、磁链等量来间接控制转矩，而是把转矩直接作为被控量来控制。

控制技术的发展完全得益于微处理器技术的发展。自 1991 年 Intel 公司推出 8×196MC 系列以来，专门用于电动机控制的芯片在品种、速度、功能、性价比等方面都有很大的发展。如日本三菱电机开发用于电动机控制的 M37705，M7906 单片机和美国德州仪器的 TMS320C240DSP 等，都是颇具代表性的产品。

4. PWM 控制技术

PWM 控制技术一直是变频变流技术的核心技术之一。从最初采用模拟电路完成三角调制波和参考正弦波比较，产生正弦脉宽调制 SPWM 信号以控制功率器件的开关开始，到目前采用全数字化方案，完成优化的实时在线的 PWM 信号输出，PWM 在各种应用场合仍占主导地位，并一直是人们研究的热点。

由于 PWM 可以同时实现变频变压反抑制谐波的特点，所以在交流传动乃至其他能量变

换系统中都得到了广泛应用。PWM 控制技术大致可以分为三类：正弦 PWM（包括电压、电流或滚通的正弦为目标的各种 PWM 方案）、优化 PWM 及随机 PWM。

三、本课程的性质、任务和要求

1. 性质

它是数控类专业的主干课程，是一门应用科学，综合了电子技术、控制原理、计算机技术、电力电子技术、电机与拖动基础、半导体变流技术等而形成一门专业课程。

2. 任务

介绍变频变流控制系统的基本理论，讲述变频器的使用、调试和维护方法；研究实际变频变流控制系统的一些基本方法和技术。

3. 要求

通过本课程的学习，要求了解上述变频变流系统的基本原理。掌握变频器的选用、安装、调试和维护方法；掌握实际调试交流变流控制系统的一些基本方法和技术。

第一章

通用变频器的的工作原理

随着交流电动机调速控制理论、电力电子及数字化控制技术的发展,交流变频调速技术日趋成熟,其应用已扩展到工业生产的所有领域,并且在家电产品中得到了广泛应用。交流电动机变频调速控制系统简称变频器,具有工作效率高、使用方便可靠等优点。

§ 1—1 通用变频器的基本工作原理

一、变频调速系统的控制方式

1. 交流异步电动机变频调速原理

交流异步电动机的转速公式为:

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

式中 f ——定子供电频率, Hz;

p ——磁极对数;

s ——转差率;

n ——电动机转速, r/min。

由公式可知,只要平滑地调节异步电动机的供电频率 f ,就可以平滑地调节异步电动机的转速。

2. 变频调速系统的控制方式

异步电动机定子绕组每相感应电动势的有效值 E_1 为:

$$E_1 = 4.44 k_{r1} f_1 N_1 \Phi_m$$

式中 E_1 ——气隙磁通在定子每相中感应电动势的有效值, V;

k_{r1} ——与绕组有关的结构常数;

f_1 ——定子频率, Hz;

N_1 ——定子每相绕组串联匝数;

Φ_m ——每极气隙磁通量, Wb。

由上式可知,如果保持定子绕组每相电动势的有效值 E_1 不变,改变定子频率 f_1 时会出现下面两种情况。

如果 f_1 大于电动机的额定频率 f_{1N} , 气隙磁通 Φ_m 就会小于额定气隙磁通 Φ_{mN} , 结果是

电动机的铁心没有得到充分利用，是一种浪费。

如果 f_1 小于电动机的额定频率 f_{1N} ，气隙磁通 Φ_m 就会大于额定气隙磁通 Φ_{mN} ，结果是电动机的铁心产生过饱和，从而导致过大的励磁电流，使电动机功率因数、效率下降，严重时还会因绕组过热而烧坏电动机。

要实现变频调速，应在不损坏电动机的情况下，充分利用电动机铁心，保持每极气隙磁通 Φ_m 不变。

(1) 基频以下调速

由 $E_1 = 4.44k_{\phi}f_1 N_1 \Phi_m$ 可知，要保持 Φ_m 不变，当频率 f_1 从额定值 f_{1N} 向下调时，必须降低 E_1 ，使 $E_1/f_1 = \text{常数}$ ，即电动势与频率之比为恒定值。绕组中的感应电动势不容易直接控制，当电动势的值较高时，可以认为 $U_1 \approx E_1$ ，即 $\frac{U_1}{f_1} = \text{常数}$ ，这就是恒压频比控制方式。

基频以下调速时的机械特性如图 1—1 所示。如果电动机在不同转速下都具有额定电流，则电动机都能在温度升高允许的条件下长期运行，这时转矩基本上随磁通变化，由于在基频以下调速时磁通恒定，所以转矩恒定。根据电机拖动原理，在基频以下调速属于“恒转矩调速”。

(2) 基频以上调速

在基频以上调速时，频率可以从 f_{1N} 向上增加，但电压 U_1 不能超过额定电压 U_{1N} ，最大为 $U_1 = U_{1N}$ ，由 $E_1 = 4.44k_{\phi}f_1 N_1 \Phi_m$ 可知——这将使磁通随频率的升高而降低，相当于直流电动机弱磁升速的情况。在基频以上调速时，由于电压 $U_1 = U_{1N}$ 不变，当频率升高时，同步转速随之升高，气隙磁动势减弱，最大转矩减小，输出功率基本不变，所以，基频以上变频调速属于“弱磁恒功率”调速。机械特性如图 1—2 所示。

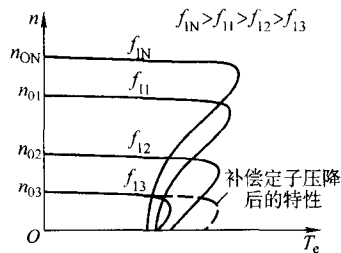


图 1—1 基频以下调速时的机械特性

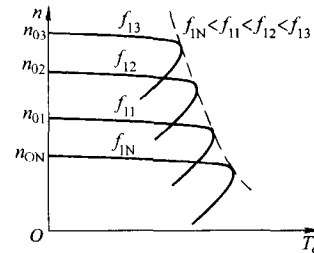


图 1—2 基频以上调速时的机械特性

通过分析可得出如下结论：当 $f_1 \leq f_{1N}$ 时，变频装置必须在改变输出频率的同时改变输出电压的幅值，才能满足对异步电动机变频调速的基本要求。

这样的装置称为变压变频（VVVF）装置，这是通用变频器工作的最基本原理。

二、SPWM 控制技术

我们希望通用变频器输出的波形是标准的正弦波，但现在的技术还不能制造出大功率、输出波形为标准正弦波的可变压变频逆变器。目前容易实现的方法是：使逆变器输出端得到一系列幅值相等而宽度不等的方波脉冲，用这些脉冲来代替正弦波或所需要的波形，即可改变逆变电路输出电压的大小，如图 1—3a, b 所示。

1. PWM 逆变原理

PWM 控制技术是变频变流技术的核心技术之一，也是目前应用较多的一种技术。逆变

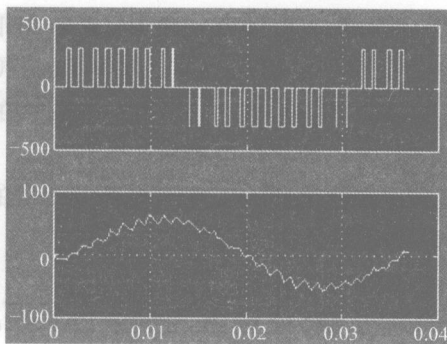
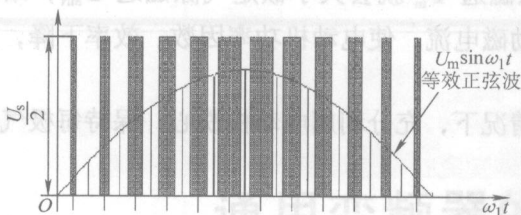


图 1—3 SPWM 波形

a) 等效波形 b) 仿真波形

器输入幅度恒定不变的直流电压，通过调节逆变器的脉冲宽度和输出交流电的频率，实现调压调频，供给负载。

如图 1—4 所示为单相逆变器的主电路，其波形如图 1—5 所示。

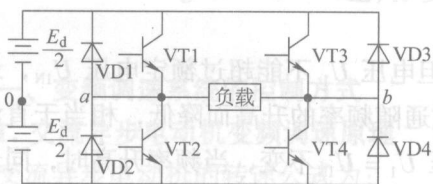


图 1—4 单相逆变器

0 为直流电源的理论中心点

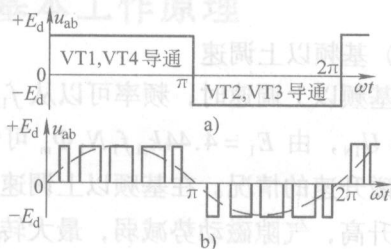


图 1—5 电路的波形

a) 180° 通电型输出方波电压波形

b) 脉宽调制型逆变器输出波形

PWM 控制方式是通过改变电力晶体管 VT1, VT4 和 VT2, VT3 交替导通的时间，从而改变逆变器输出波形的频率；改变每半周内开关器件 VT1, VT4 或 VT2, VT3 的通、断时间比，即改变脉冲宽度来改变逆变器输出电压幅值的大小。如果使开关器件在半个周期内反复通、断多次，并使每个矩形波电压下的面积接近于对应正弦波电压下的面积，则逆变器输出电压将很接近于基波电压，高次谐波电压将大为降低。若采用快速开关器件，使逆变器输出脉冲次数增多，即使输出低频时，输出波形也是好的。所以 PWM 型逆变器特别适用于异步电动机的变频调速的供电电源。

2. 单极性正弦波 PWM

PWM 型逆变器是通过改变脉宽控制其输出电压，通过改变调制周期来控制其输出频率，所以脉宽调制方式对 PWM 型逆变器的性能具有根本性的影响。脉宽调制的方法很多，从调制脉冲的极性上看，有单极性和双极性之分；从载频信号 u_c 和参考信号 u_r 的频率之间的关系来看，又有同步式和异步式两种。

参考信号 u_r 为正弦波的脉宽调制称为正弦波脉宽调制 (SPWM)，产生的调制波是等幅而不等宽的矩形脉冲，如图 1—6 所示。

SPWM 调制波的脉冲宽度基本上成正弦分布，各脉冲与正弦曲线下对应的面积近似成正

比。SPWM 逆变器输出的基波电压的大小和频率均由参考电压 u_r 来控制。当改变 u_r 幅值时，脉宽随之改变，从而可改变输出电压的大小；当改变 u_r 频率时，输出电压频率随之改变。但正弦波最大幅值必须小于三角形幅值，否则输出电压的大小和频率就将失去所要求的配合关系。

对于三相逆变器，必须产生互差 120° 的三相调制波。载频三角波可以共享，但必须有一个三相可变频变幅正弦波发生器，产生变频变幅三相正弦参考信号，然后分别与三角波相比较，产生三相脉冲调制波。

若脉冲调制波在任何输出频率情况下，正、负半周始终保持完全对称，即为同步调制式。若载频三角波频率一定，只改变正弦参考信号频率，这时正、负半周的脉冲数和相位就不是始终对称的，这种调制方式称为异步调制式。

3. 双极性正弦波 PWM

SPWM 双极性调制和单极性调制的调制原理相同，输出基波大小和频率也是通过改变正弦参考信号的幅值和频率而改变的，如图 1—7 所示。用于变频调速时，要保持 U/f 比恒定。由于是双极性调制，所以不必像单极性调制那样，不需加倒向控制信号。双极性调制方式，也可以采用同步式或异步式的调制方法。

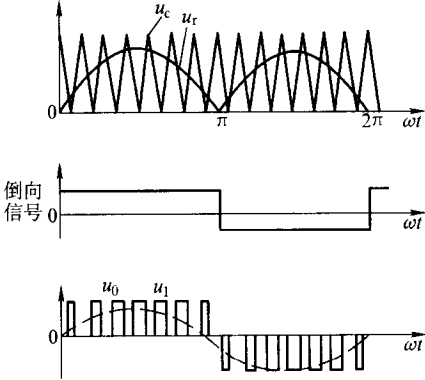


图 1—6 正弦波脉宽调制波形

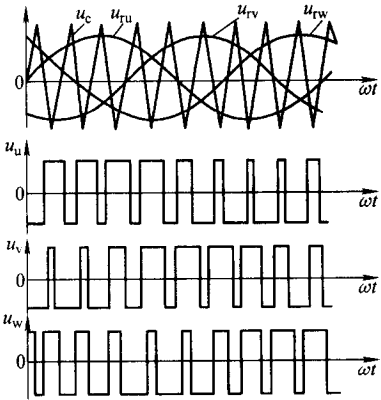


图 1—7 三相正弦波脉宽调制波形

§ 1—2 通用变频器的结构原理

一、变频器的基本结构

变频器是把电压、频率固定的交流电变成电压、频率可调的交流电的变换器，变频器的基本结构原理如图 1—8 所示，与外界的联系基本上分为三部分：

1. 主电路接线端

主电路接线端如图 1—9 所示，包括：

(1) 输入端

工频电网的输入端为 R, S, T, 有的标志为 L1, L2, L3。

(2) 输出端

输出端为 U, V, W, 是变频器接电动机的端点。

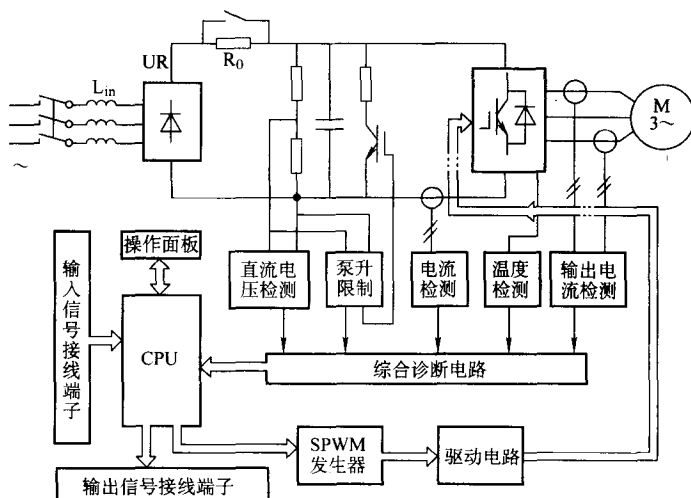


图 1—8 变频器的基本结构

2. 控制端子

控制端子包括外部信号控制变频器的端子、变频器工作状态指示端子以及变频器与计算机或其他变频器的通信接口，如图 1—10 所示。

3. 操作面板

操作面板包括液晶显示屏和键盘，如图 1—11 所示。

二、变频器的类别

1. 按照变换环节分类

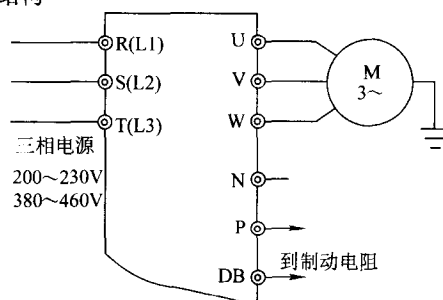


图 1—9 主电路接线端

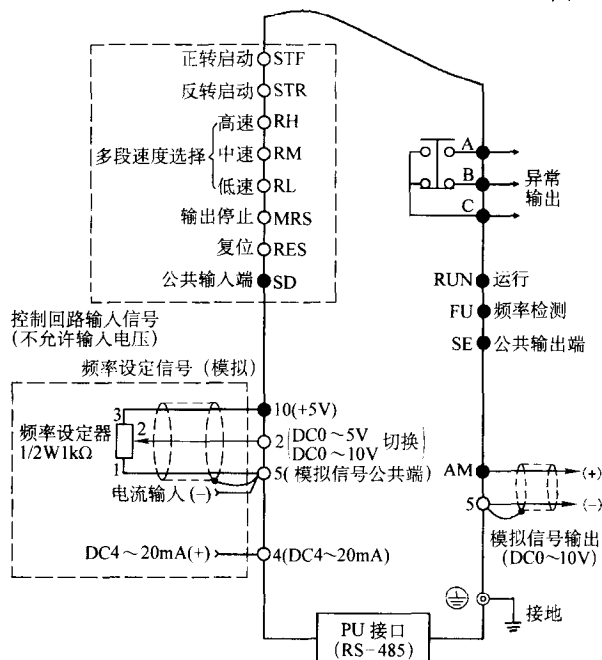


图 1—10 控制电路接线端子

(1) 交—交变频器

交—交变频器把频率固定的交流电源直接转换成频率连续可调的交流电源。其主要优点是没有中间环节，变频效率高，但其连续可调的频率范围窄，一般为额定频率的1/2以下，主要用于容量大、低速的场合。

(2) 交—直—交变频器

交—直—交变频器先把频率固定的交流电变成直流电，再把直流电逆变成频率可调的三相交流电。在此类装置中，用不可控整流，则输入功率因数不变；用PWM逆变，则输出谐波减小。PWM逆变器需要全控式电力电子器件，其输出谐波减小的程度取决于PWM的开关频率，而开关频率则受器件开关时间的限制。采用P—MOSFET或IGBT时，开关频率可达20 kHz以上，输出波形已经非常接近正弦波，因而又称为正弦脉宽调制（SPWM）逆变器，是目前通用变频器经常采用的一种形式。

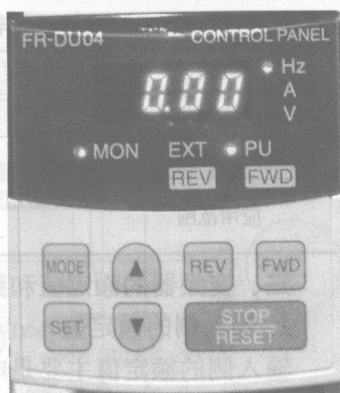


图 1—11 操作面板

2. 按照滤波方式分类

(1) 电压源型变频器

在交—直—交变频器装置中，当中间直流环节采用大电容滤波时，直流电压波形比较平直，在理想情况下，是一个内阻为零的恒压源，输出交流电压是矩形波或阶梯波，这类变频装置称为电压源型变频器，如图 1—12a 所示。由于滤波电容上的电压不能发生突变，所以电压源型变频器的电压控制响应慢，适用在作为多台电动机同步运行时的供电电源但不要求快速加减速的场合。如果把不可控整流器改成可控整流器，电压源型变频器的调速系统要实现回馈制动和四象限运行却比较困难，因为其中间直流环节有大电容钳制电压，使之不能迅速反向，而电流也不能反向，所以在原装置上无法实现回馈制动。

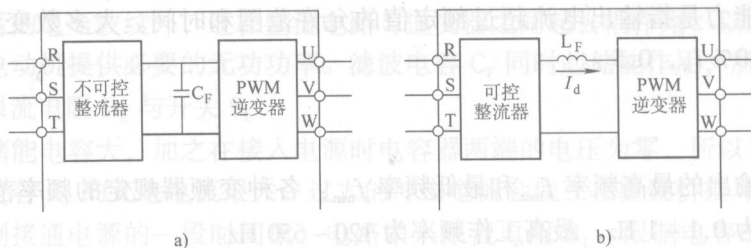


图 1—12 电压源型和电流源型交—直—交变频器

a) 电压源型 b) 电流源型

(2) 电流源型变频器

当交—直—交变频装置中的中间直流环节采用大电感滤波时，输出交流电流是矩形波或阶梯波，这类变频装置叫做电流源型变频器，如图 1—12b 所示。由于滤波电感上的电流不能发生突变，所以电流源型变频器对负载变化的反应迟缓，不适用于多电动机传动，适用于一台变频器给一台电动机供电的单电动机传动，但可以满足快速启动、制动和可逆运行的要求。如果把不可控整流器改成可控整流器，电流源型变频调速系统容易实现回馈制动，便于实现四象限运行，适用于需要制动和经常正、反转的电动机负载。电压源型变频器

和电流源型变频器的项目比较见表 1—1。

表 1—1 电压源型变频器和电流源型变频器项目比较

比较项目	电压源型变频器	电流源型变频器
整流电路	不可控整流桥	可控整流桥
直流滤波储能环节	大电容	大电感
应用范围	适用于不要求快速加减速的多台电动机同步运行或单电动机运行的场合	适用要求具有快速启动、制动和可逆运行的单电动机场合

三、变频器的额定值和频率指标

1. 输入侧的额定值

输入侧的额定值主要是电压和相数。小容量的变频器输入指标有以下几种：

- (1) 380 V/50 Hz，三相，用于国内设备。
- (2) 220 V/50 Hz 或 60 Hz，三相，主要用于进口设备。
- (3) 200 ~ 230 V/50 Hz，单相，主要用于家用电器。

2. 输出侧的额定值

- (1) 输出电压 U_N

由于变频器在变频的同时也要变压，所以输出电压的额定值是指输出电压中的最大值。

- (2) 输出电流 I_N

I_N 是指允许长时间输出的最大电流。

- (3) 输出容量 S_N (kV·A)

S_N 与 U_N 和 I_N 的关系为： $S_N = \sqrt{3} U_N I_N$ 。

- (4) 配用电动机容量 P_N (kW)

变频器规定的配用电动机容量，适用于长期连续负载运行。

- (5) 超载能力

变频器的超载能力是指输出电流超过额定值的允许范围和时间。大多数变频器规定为 150% I_N ，60 s 或 180% I_N ，0.5 s。

3. 频率指标

- (1) 频率范围

即变频器能够输出的最高频率 f_{max} 和最低频率 f_{min} 。各种变频器规定的频率范围不一样，一般最低工作频率为 0.1 ~ 1 Hz，最高工作频率为 120 ~ 650 Hz。

- (2) 频率精度

频率精度指变频器输出频率的准确程度。用变频器的实际输出频率与设定频率之间的最大误差与最高工作频率之比的百分数来表示。例如，富士 G9S 的频率精度为 ± 0.01 ，是指在 -10 ~ 15℃ 环境下，数字设定所能达到的最高频率精度。

- (3) 频率分辨率

频率分辨率指输出频率的最小改变量，即每相邻两挡频率之间的最小差值。一般分模拟设定分辨率和数字设定分辨率。

四、变频器的主电路

主电路由整流电路、中间直流电路和逆变器三部分组成。电压源型交—直—交变压变频器主电路的基本结构如图 1—13 所示。

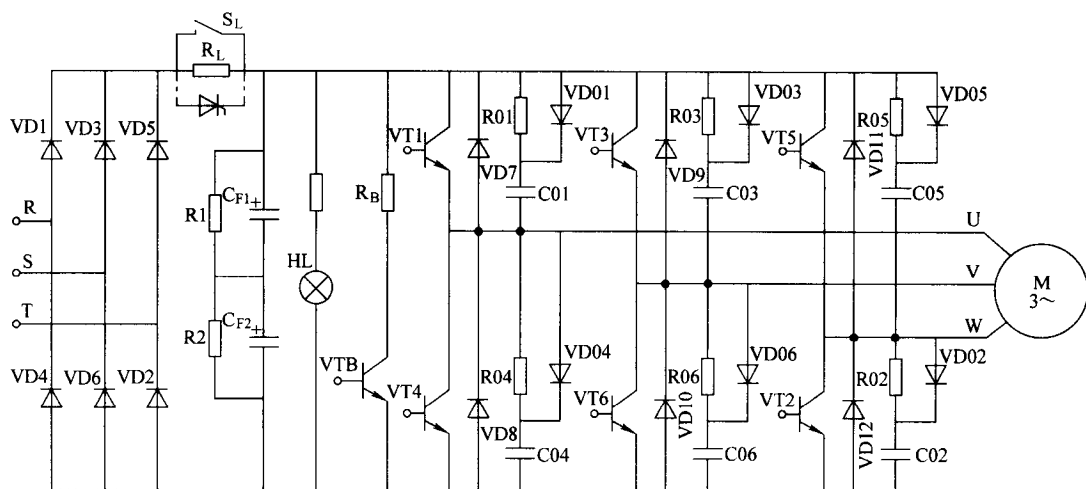


图 1—13 电压源型交—直—交变压变频器主电路的基本结构

1. 交—直部分

(1) 整流电路

整流电路由 VD1 ~ VD6 组成三相不可控整流桥，将电源的三相交流电全波整流成直流电。整流电路因变频器输出功率大小不同而不同。功率小的，输入电源多用单相 220 V 电源，整流电路为单相全波整流电路；功率大的，输入电源一般用三相 380 V 电源，整流电路为三相桥式全波整流电路。

设电源的线电压为 U_L ，那么三相全波整流后平均直流电压 U_D 的大小是： $U_D = 1.35 U_L$ 。三相电源为 380 V 时，整流后的平均直流电压是 513 V。

(2) 滤波电容 C_F

整流电路输出的整流电压是脉动的直流电压，必须加以滤波。滤波电容 C_F 的作用除了滤除整流后的电压波纹外，还在整流电路与逆变器之间起去耦作用，以消除相互干扰，为感性负载的电动机提供必要的无功功率。滤波电容 C_F 同时起储能作用，所以也叫储能电容。

(3) 限流电阻 R_L 与开关 S_L

由于储能电容大，加之在接入电源时电容器两端的电压为零，所以当变频器接通电源瞬间，滤波电容 C_F 的充电电流很大。过大的冲击电流会使三相整流桥损坏。为了保护整流桥，在变频器刚接通电源的一段时间里，电路串入限流电阻 R_L ，限制电容的充电电流。当滤波电容 C_F 充到一定程度时，令 S_L 接通，将 R_L 短接。在有些变频器里， S_L 用晶闸管代替，如图 1—13 虚线所示。

(4) 电源指示 HL

HL 除了指示电源是否接通以外，还有一个功能，即变频器切断电源后，显示滤波电容 C_F 上的电荷是否已经释放完毕。

2. 直—交部分

(1) 逆变管 VD1 ~ VD6

VD1 ~ VD6 组成逆变桥，把 VD1 ~ VD6 整流后的直流电，“逆变”成频率、幅值都可调的交流电。这是变频器实现变频的执行环节，是变频器的核心部分。常用的逆变管有绝缘栅双极晶体管 (IGBT)、大功率晶体管 (GTR)、可关断晶闸管 (GTO)、功率场效应管 (MOS-