

---

# PLC/变频器/触摸屏 综合控制技术

# 第二篇、变频器

## 模块一 变频驱动技术基础知识

- 一、通用变频器的基本认识
- 二、通用变频器的内部基本结构
- 三、通用变频器的工作原理
- 四、变频器的控制方式

# 任务一、变频系统的基本认识

# 一、为什么要采用变频的方式来调速

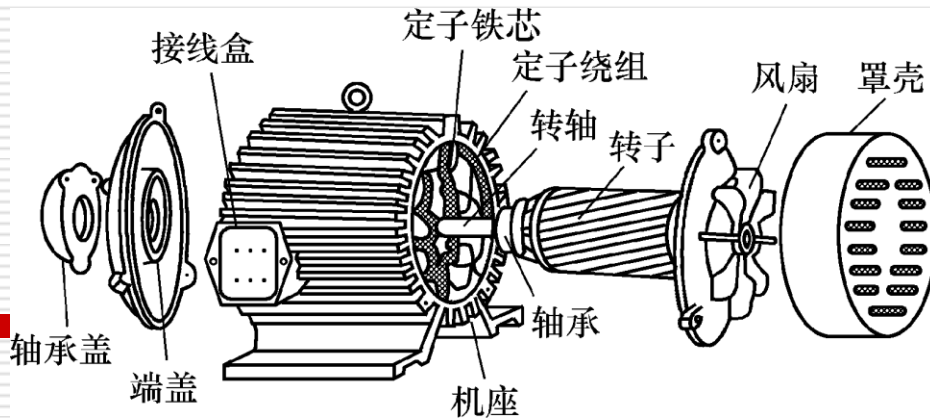


如何调速？

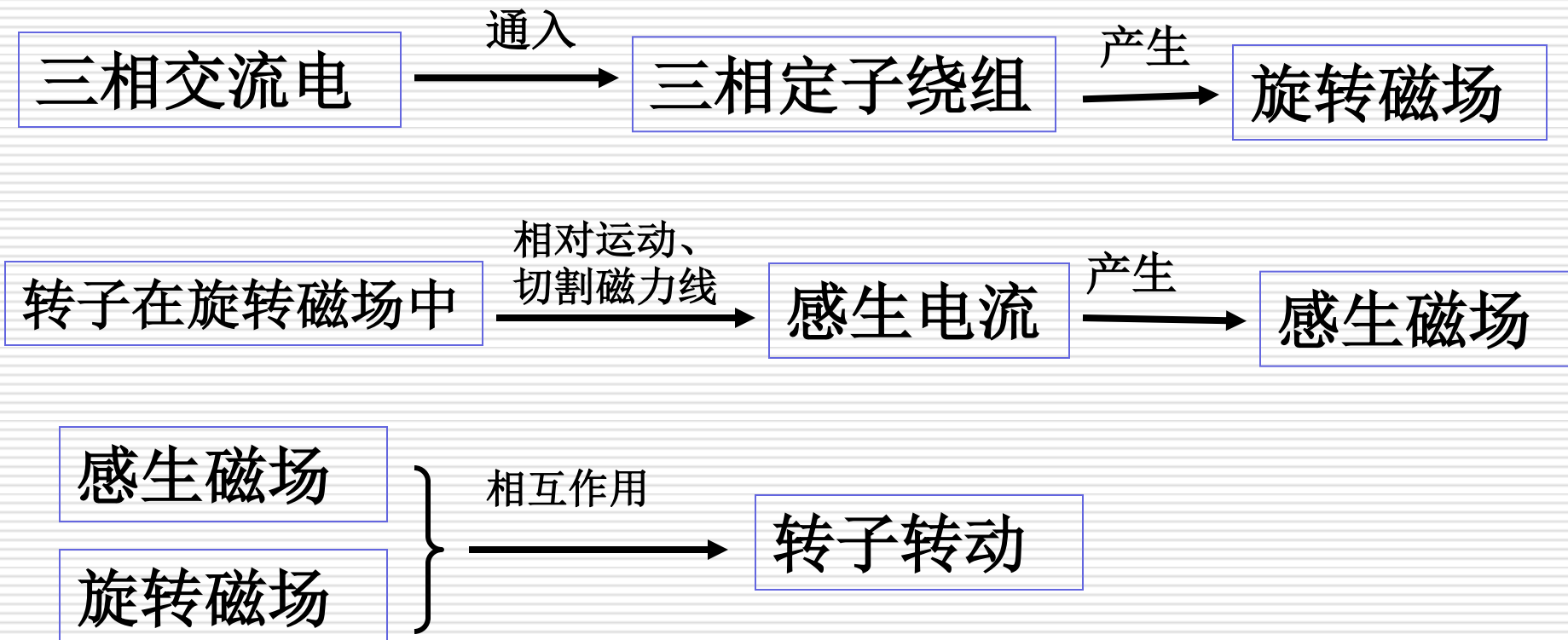


跟电动机转动原理有关

# 结构： 定子 + 转子



# 工作原理：





根据电动机的工作原理，可知调速方法有哪些？

## 三相异步电动机的转速公式：

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

n——电动机转速 (转/分)

f——交流电频率 (Hz)

s——电动机滑差

p——电机极对数

所以调速方式有：

变转差率、调频、变极



## 交流电机的调速方式

- 改变电机的极对数
- 改变电机的转差率
  - 转子串电阻调速
  - 定子调压调速
  - 电磁转差离合器调速
  - 转子串级调速
- 改变电机的供电频率，即变频调速

为什么选择变频调速方式？

## 交流电气传动系统的发展历程

控制对象	调速方式名称	特点	早
交流异步电动机	变极调速	有级调速，系统简单，最多4段速	↓ 发展时间 ↓ 晚
	调压调速	无级调速，调速范围窄 电机最大出力能力下降，效率低	
	转子串电阻调速	系统简单，性能较差	
交流异步电动机 交流同步电动机	变频调速	真正无级调速，调速范围宽 电机最大出力能力不变，效率高 系统复杂，性能好 可以和直流调速系统相媲美	

- 三相交流异步电动机多用鼠笼式电机，尽管调速性能比不上直流电机和交流同步电机，但其结构坚固、耐用而且价格低廉，所以在一般的传动现场很常用。



变频如何实现？

## 二、通用变频器的内部基本结构

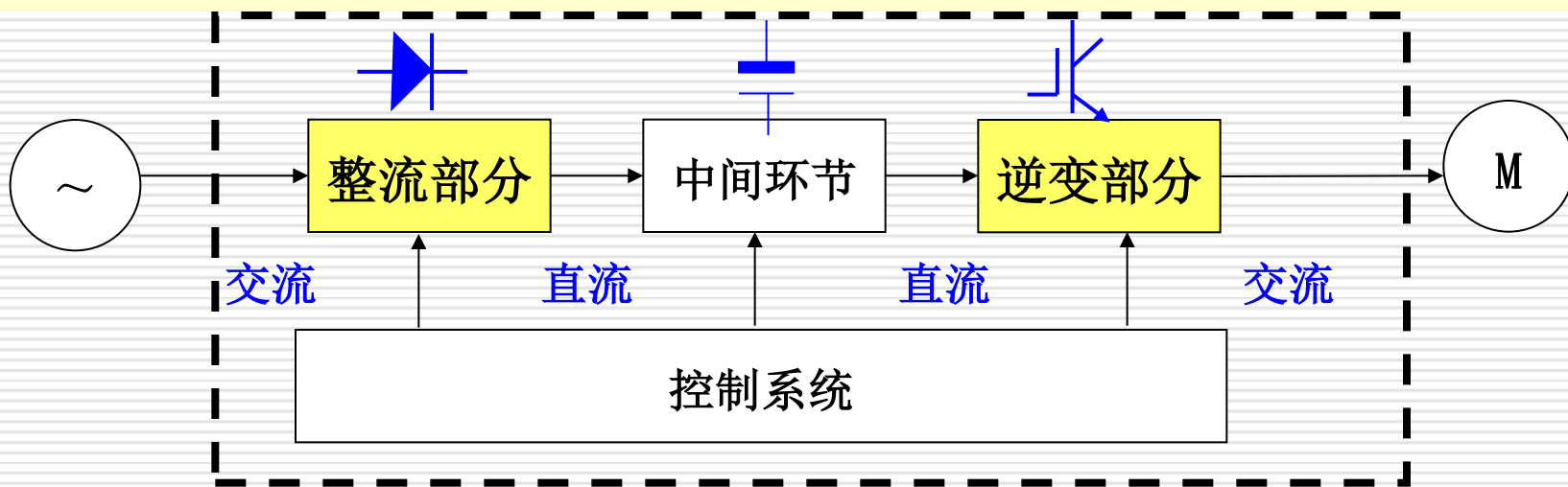
变频器通常有：交-交变频及交-直-交变频两种。

其中交-交变频就是把电网频率的交流电转换成可调频率的交流电，此类变频器能量转换效率较高，多应用于大功率的三相异步电动机和同步电动机的低速变频调速。但由于交-交变频输出频率低（一般为电网频率的 $1/3 \sim 1/2$ ）和功率因数低，使其应用受到限制。

此处介绍的是交-直-交变频。

## 二、变频器的内部基本结构：

低压通用变频器通常为“交直交”变频方式，系统框图如下：



- 1、**整流器**：将交流→成直流的装置，其输入电压为正弦波；
- 2、**逆变器**：将直流→交流的装置，其输出电压为非正弦波，输出电流近似正弦；
- 3、**中间环节**：缓冲、储能；
- 4、**控制系统**：软硬件电路结合，完成对逆变器的开关控制、对整流器的电压控制及各种保护功能等。

---

## 三、变频器简要工作原理： 整流、中间环节、逆变



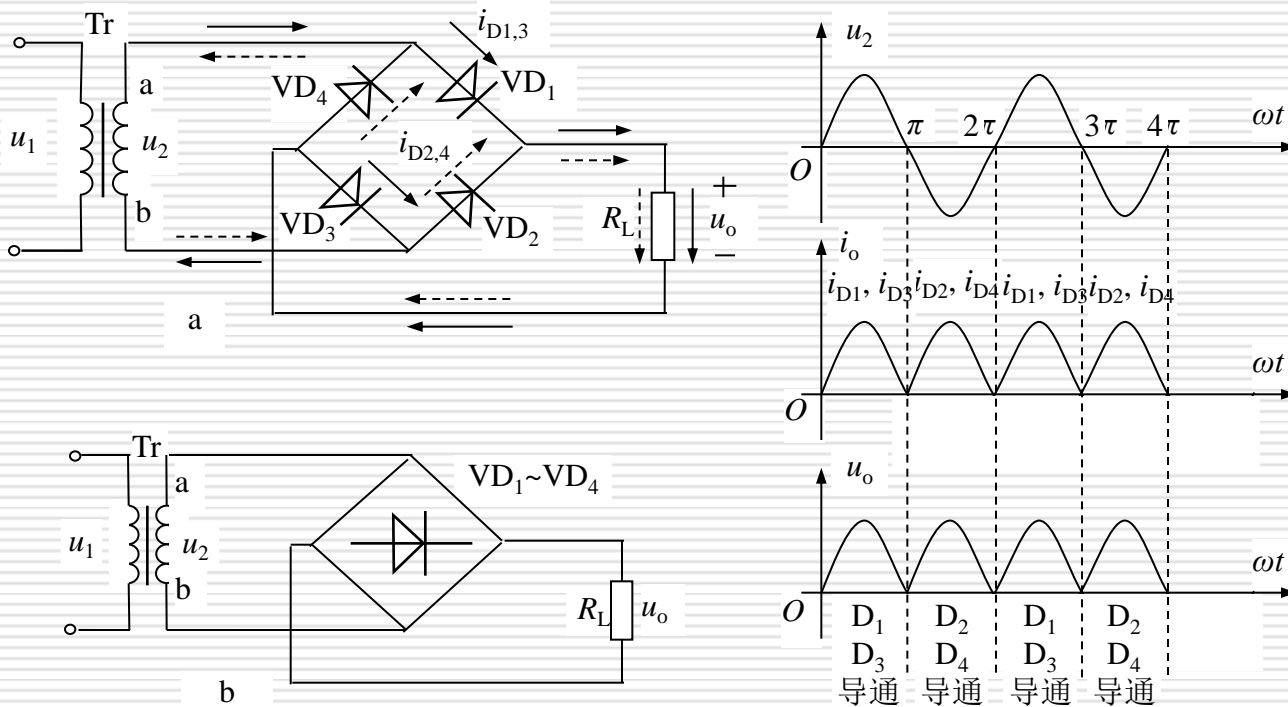
## 变频是什么意思？

改变电的频率叫变频

交流→直流： 整流

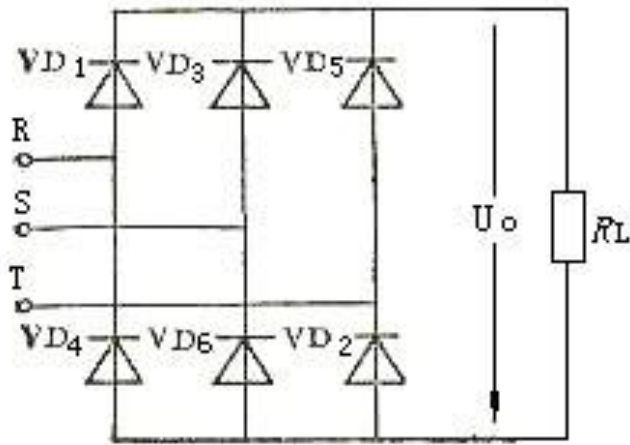
直流→交流： 逆变

# 1、整流电路工作原理（单相整流为例）

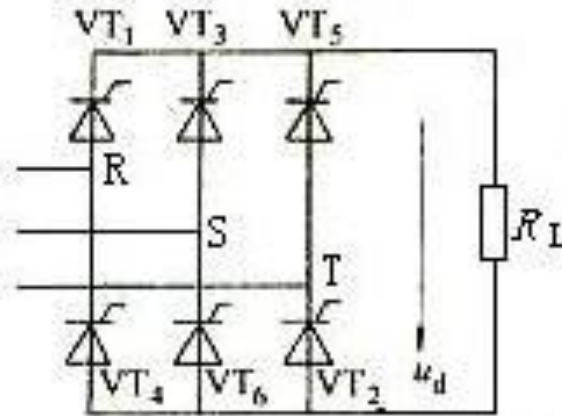


- 将交流电流变换成单向脉动电流的过程叫作整流，
- 整流电路就是利用二极管的单向导电性将交流电转换成直流电的电路。

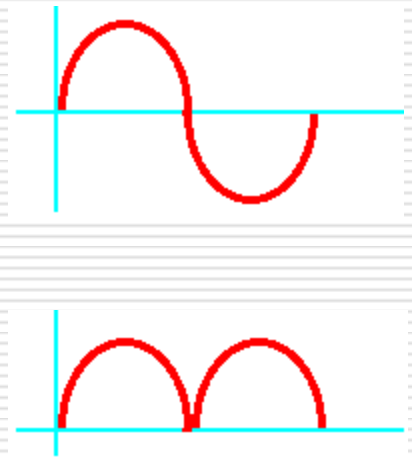
# 1、整流电路工作原理（三相整流）



不可控整流电路

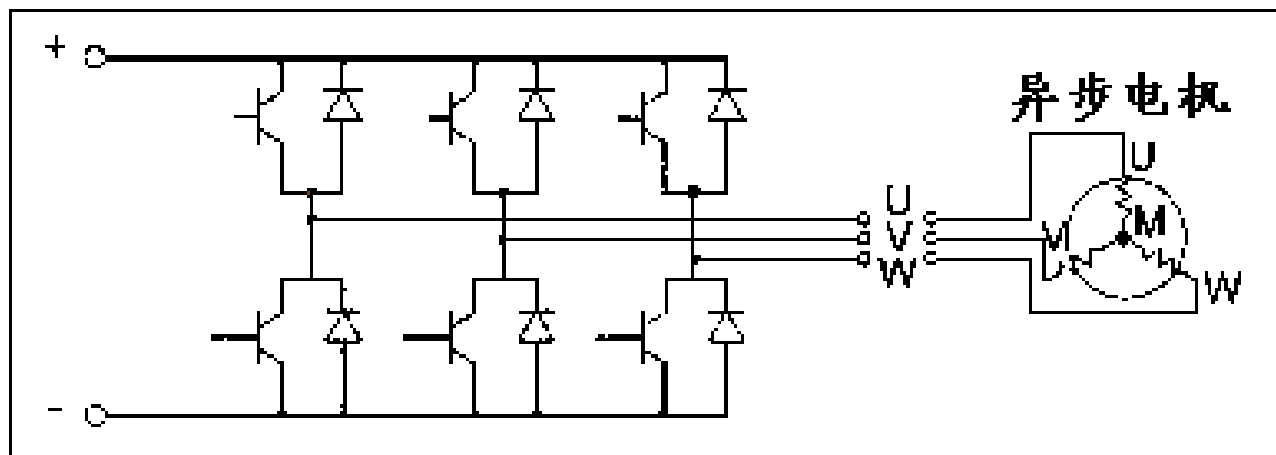


可控整流电路



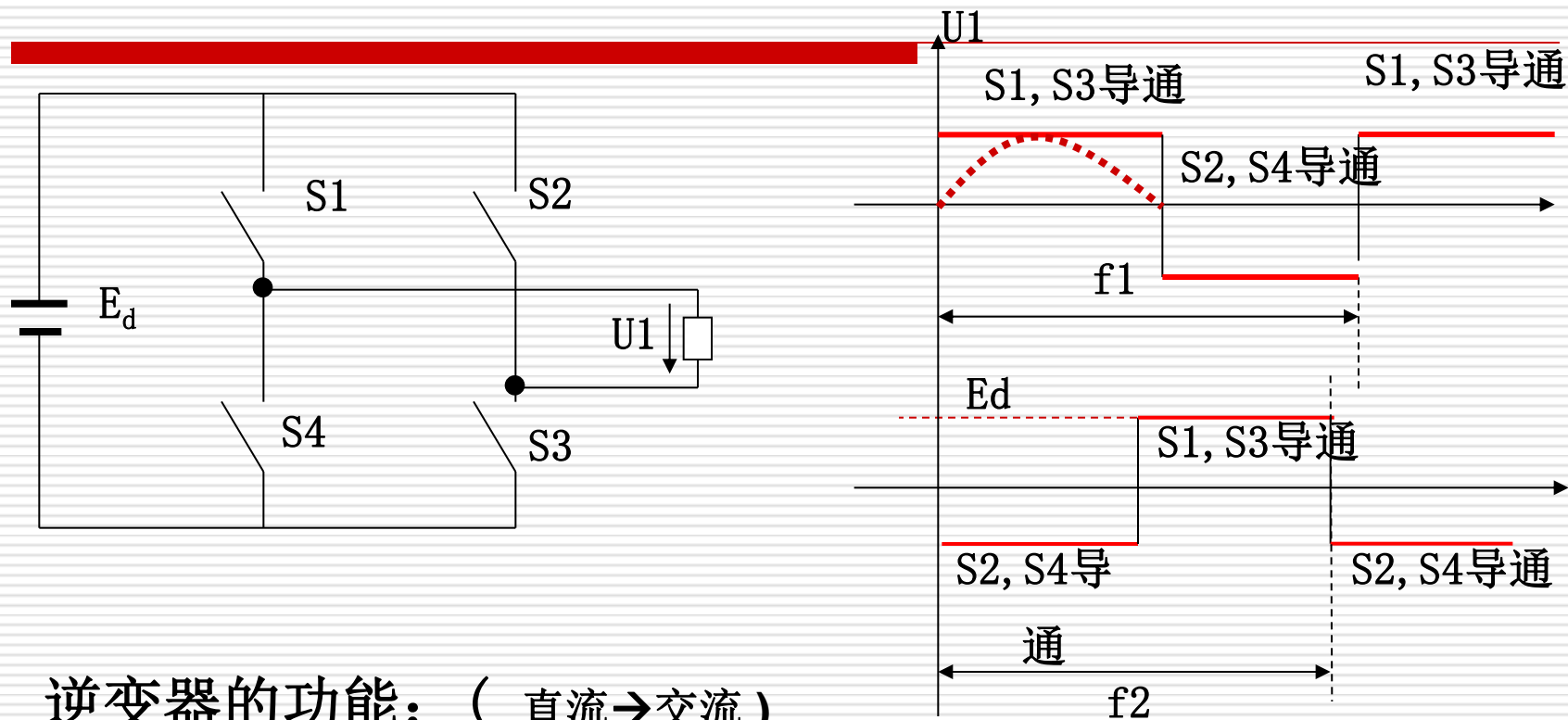
整流电路的作用是将交流电**AC**转换成脉动直流电**DC**。

## 2、逆变器工作原理



- 通过按规定顺序接通和关断6个晶体管的三个，轮流导通,逆变器将直流回路中的直流电压变换成电压、频率都可变化的三相交流电。
- 晶体管作为开关使用，当一个晶体管关断以后续流二极管释放多余的能量。

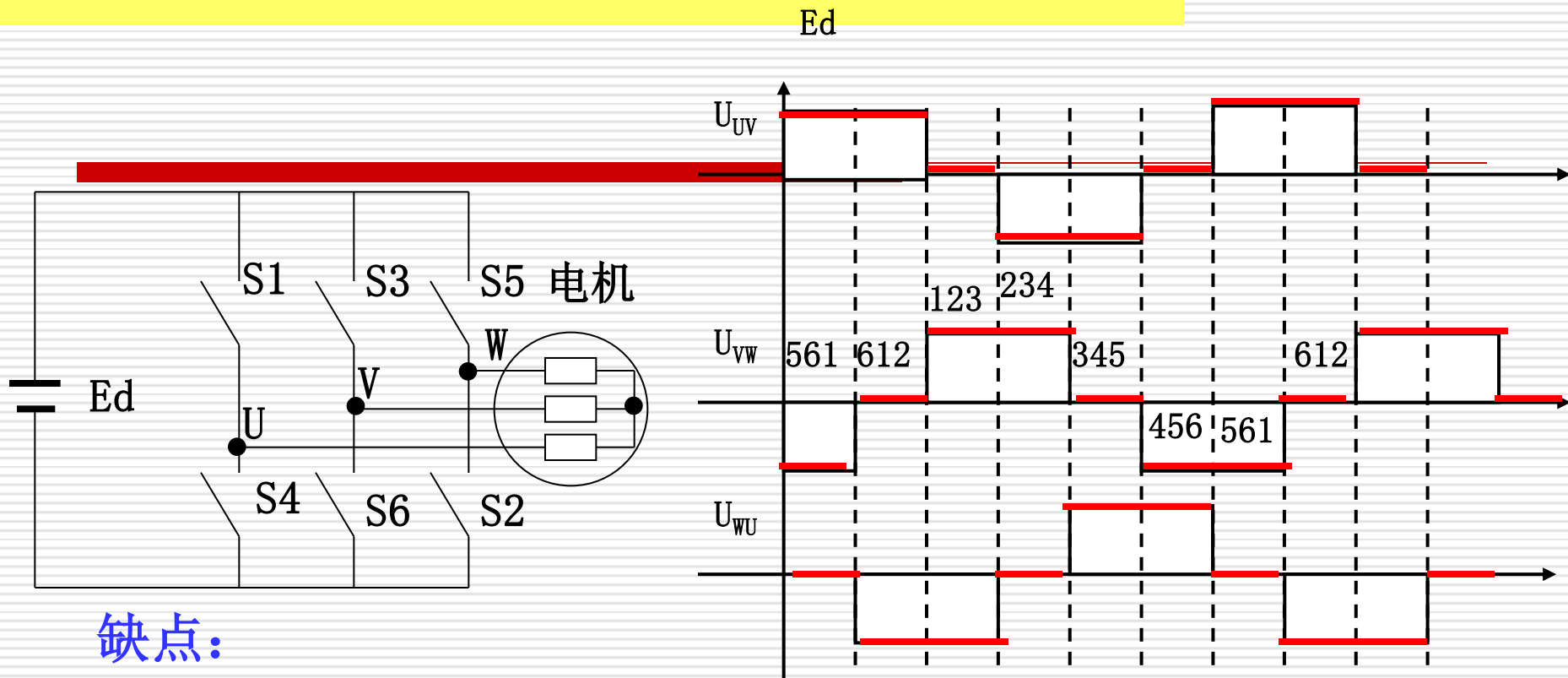
## 2、逆变器工作原理（单相逆变电路为例）



逆变器的功能：（ 直流→交流）

- 通过改变开关管导通时间改变输出电压的频率
- 通过改变开关管导通顺序改变输出电压的相序

## 2、逆变器工作原理（三相逆变电路）



缺点:

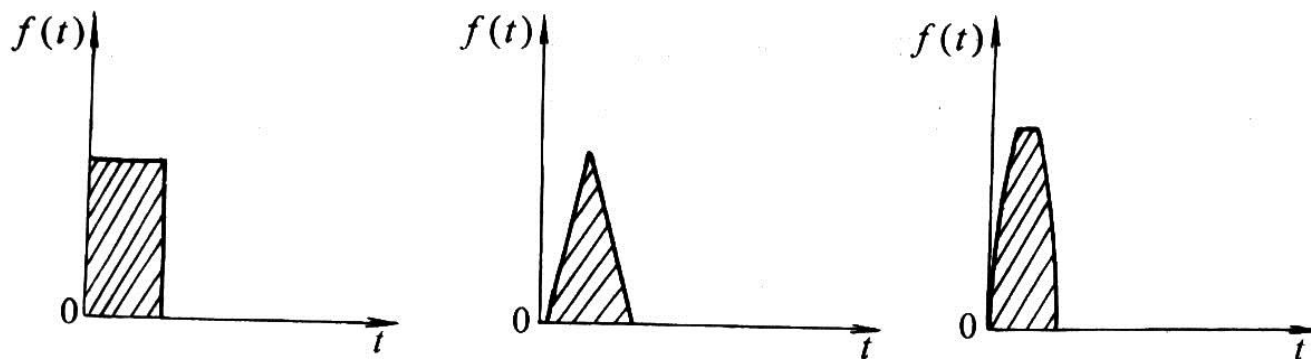
- 输出电压的谐波分量太大
- 电机谐波损耗增加，发热严重甚至烧坏电机
- 转矩脉动较大，低速运行时影响转速的平稳
- 直到从通信技术中采用PWM调制才大大的缓解了以上问题

# SPWM控制技术简介

- ❑ **PAM (Pulse Amplitude Modulation)**脉幅调制型，是一种改变电压源的电压 $U_d$ 或电流源 $I_d$ 的幅值，进行输出控制的方式。
- ❑ **PWM (Pulse Width Modulation)** 脉宽调制型，是靠改变脉冲宽度来控制输出电压，通过改变调制周期来控制其输出频率。
- ❑ **SPWM (Sinusoidal PWM)** 正弦波脉宽调制型，SPWM控制方式就是对逆变电路开关器件的通断进行控制，使输出端得到一系列幅值相等而宽度不等的脉冲，用这些脉冲来代替正弦波所需要的波形。

# SPWM控制的基本原理

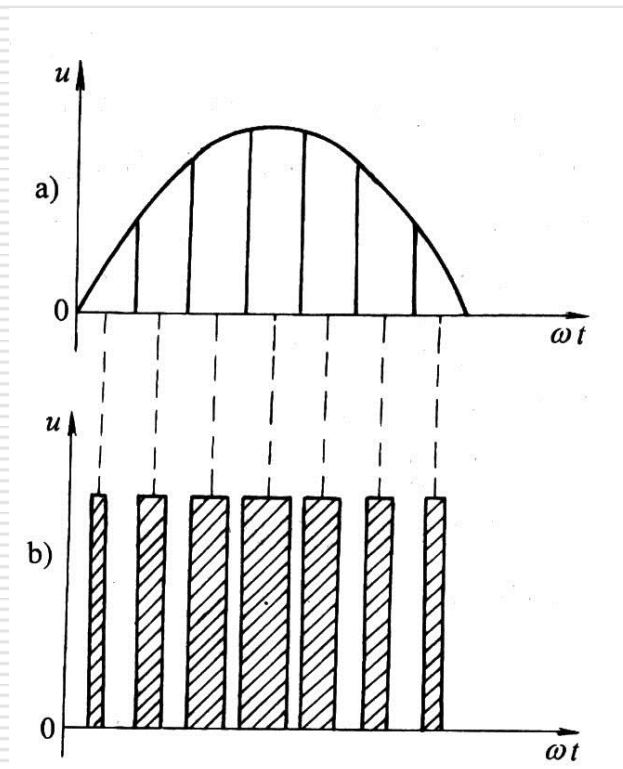
采样控制理论有这样一个结论：冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时，其效果基本相同。冲量即指窄脉冲的面积，效果基本相同是指环节的输出响应波形基本相同。如图所示的三种窄脉冲形状不同，但面积相同。当它们分别加在同一个惯性环节上时，其输出响应基本相同。且脉冲越窄，其输出差异越小。



冲量相等形状不同的三种窄脉冲

# SPWM控制的基本原理

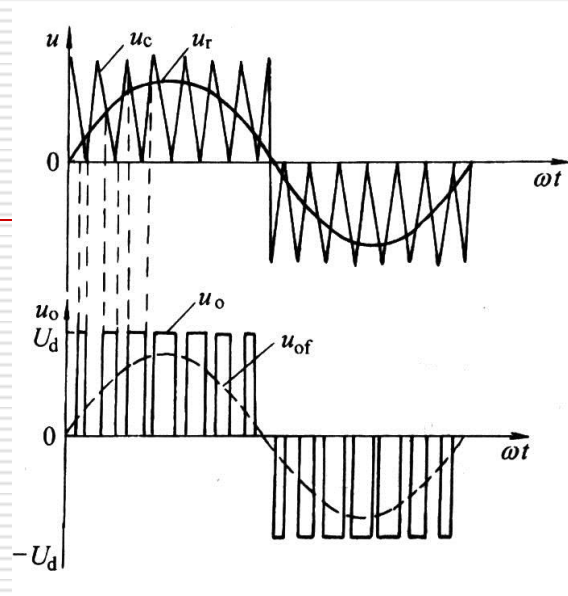
根据上述理论，正弦波可用一系列等幅不等宽的脉冲来代替。如图所示。



# PWM逆变电路的控制方式

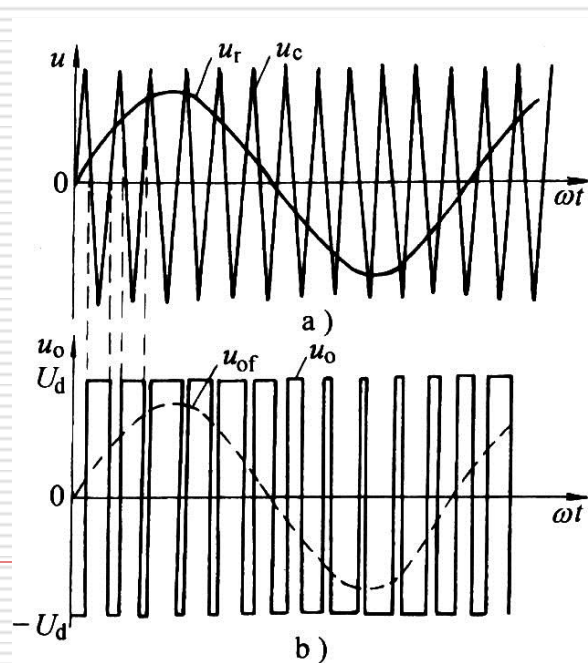
## 1. 单极性方式

单极性控制方式波形如上图，载波  $u_c$  在调制信号波  $u_r$  的正半周为正极性的三角波，在负半周为负极性的三角波。



## 2. 双极性控制方式

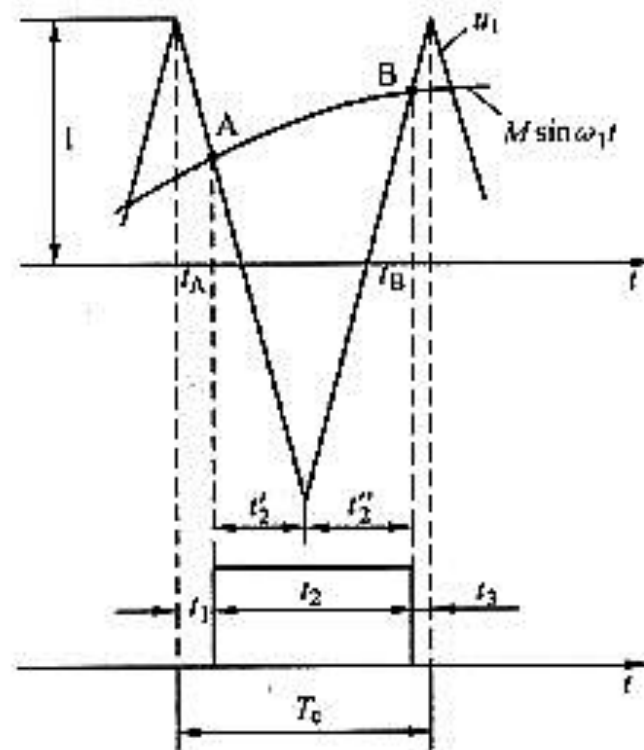
双极性控制方式波形如下图，在  $u_r$  的半个周期内，三角波载波是在正负两个方向变化的，所得到的PWM波形也是在两个方向变化的。



# SPWM波形成的方法

## 1. 自然采样法

自然采样法即计算正弦信号波和三角载波的交点，从而求出相应的脉宽和间歇时间，生成SPWM波形。右图表示截取一段正弦与三角波相交的实时状况。检测出交点A是发出脉冲的初始时刻，B点是脉冲结束时刻。 $T_C$ 为三角波的周期； $t_2$ 为AB之间的脉宽时间， $t_1$ 和 $t_3$ 为间歇时间。显然， $T_C = t_1 + t_2 + t_3$ 。



# SPWM波形形成的方法

---

## 2. 数字控制法

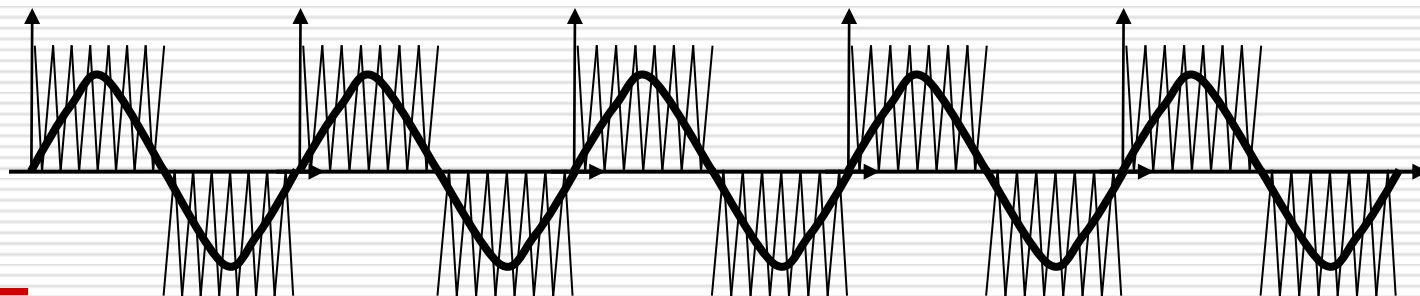
数字控制法，是由微机存储预先计算好的SPWM数据表格，控制时根据指令调出，由微机的输出接口输出。

## 3. 采用SPWM专用集成芯片

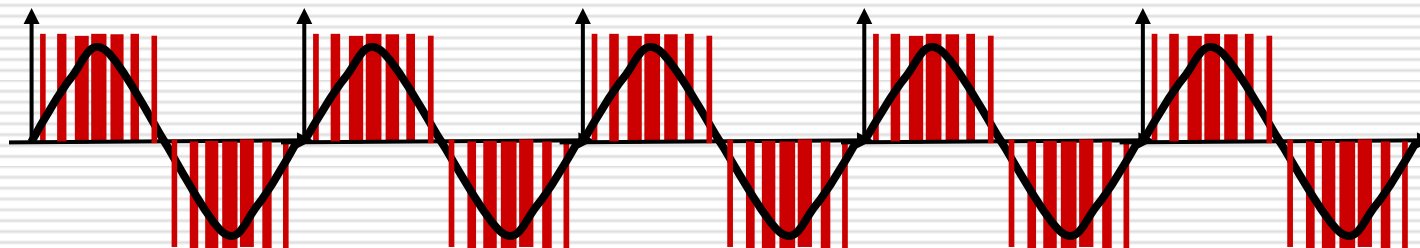
用微机产生SPWM波，其效果受到指令功能、运算速度、存储容量等限制，有时难以有很好的实时性，因此，完全依靠软件生成SPWM波实际上很难适应高频变频器的要求。

随着微电子技术的发展，已开发出一批用于发生SPWM信号的集成电路芯片。目前已投入市场的SPWM芯片进口的有HEF4725、SLE4520，国产的有THP4725、ZPS--101等。有些单片机本身就带有SPWM端口，如8098、80C196MC等。

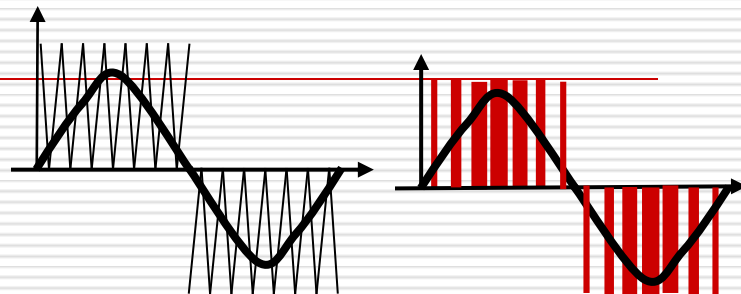
# PWM 方式-----脉冲宽度调节方式



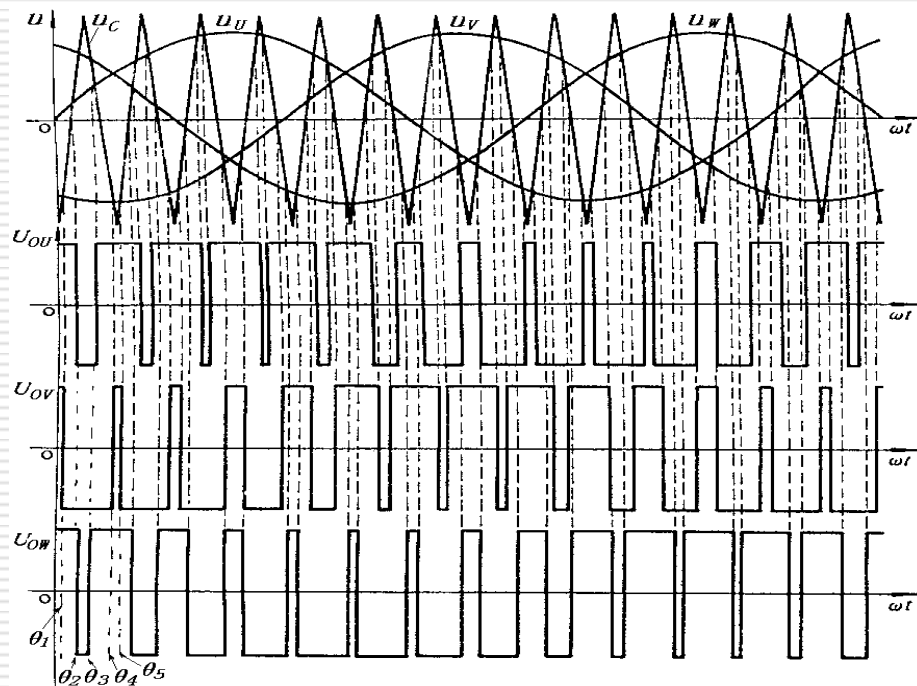
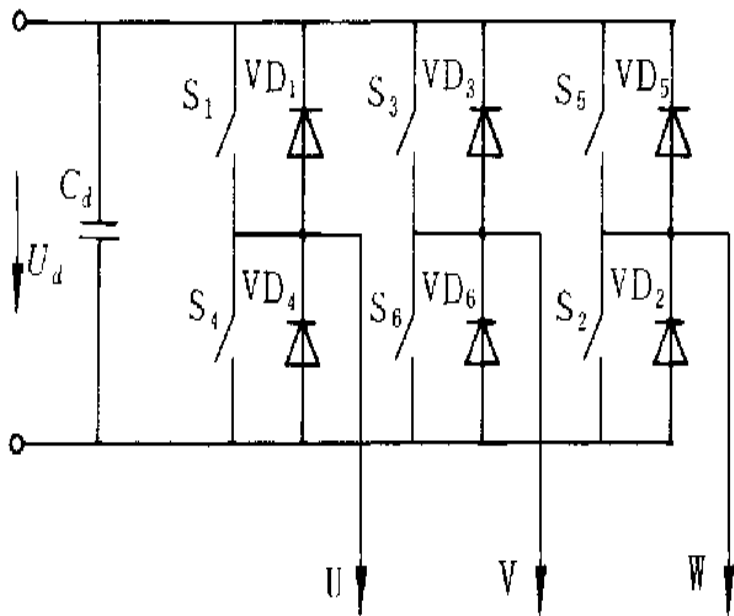
PWM调制



# PWM 方式-----脉冲宽度调节方式



PW



## 3、中间电路

变频器的中间电路有滤波电路和制动电路等不同的形式。

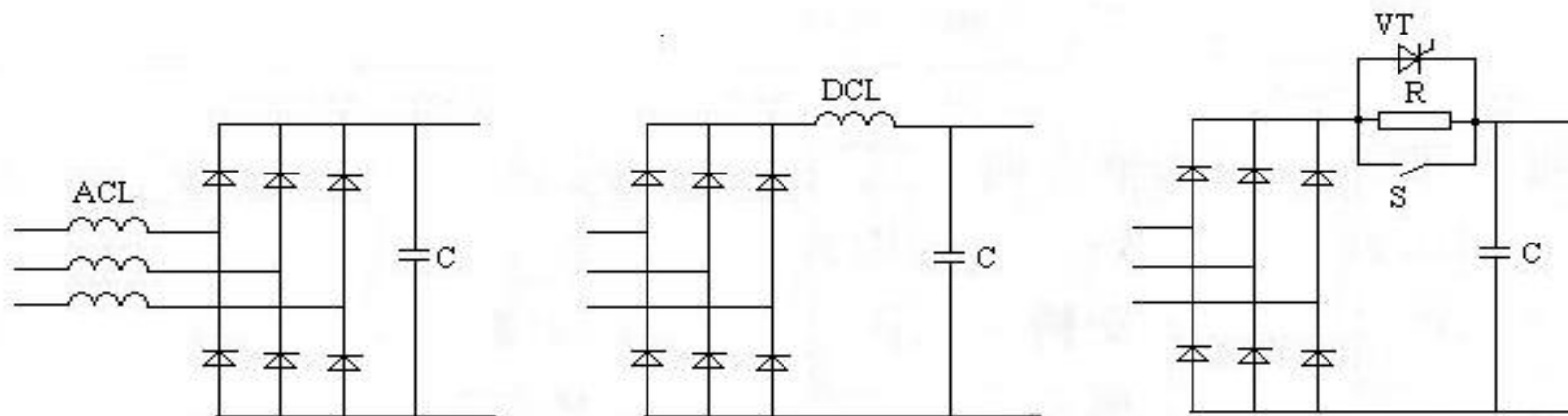
### \*滤波电路

虽然利用整流电路可以从电网的交流电源得到直流电压或直流电流，但是这种电压或电流含有频率为电源频率6倍的纹波，则逆变后的交流电压、电流也产生纹波。因此，必须对整流电路的输出进行滤波，以减少电压或电流的波动。这种电路称为滤波电路。

# (1) . 电容滤波

通常用大容量电容对整流电路输出电压进行滤波。由于电容量比较大，一般采用电解电容。

二极管整流器在电源接通时，电容中将流过较大的充电电流(亦称浪涌电流)，有可能烧坏二极管，必须采取相应措施。

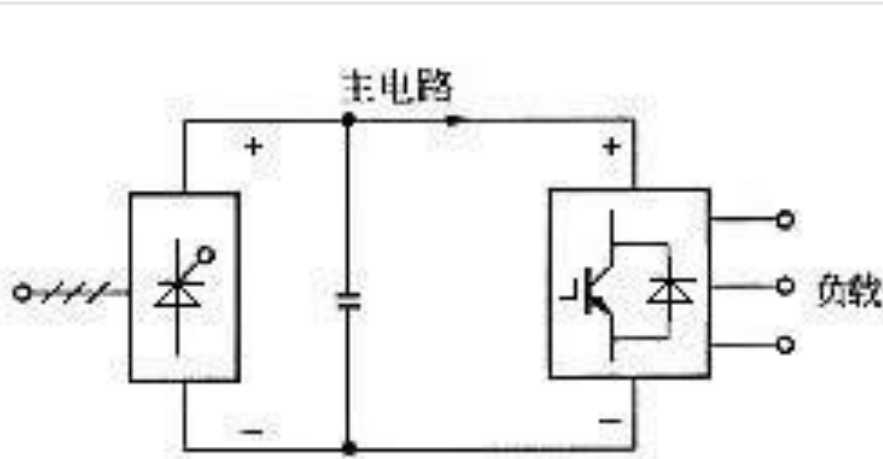


a) 接入交流电抗 b) 接入直流电抗 c) 串联充电电阻

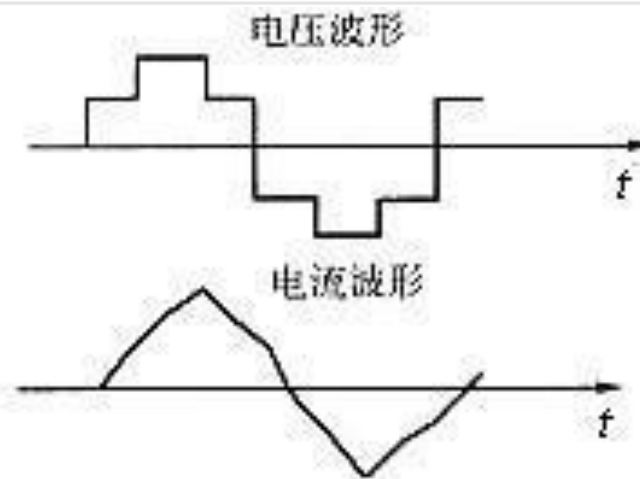
图、抑制浪涌电流的方式

# (1) . 电容滤波

采用大电容滤波后再送给逆变器，这样可使加于负载上的电压值不受负载变动的影响，基本保持恒定。该变频电源类似于电压源，因而称为电压型变频器。电压型变频器逆变电压波形为方波，而电流的波形经电动机负载的滤波后接近于正弦波。



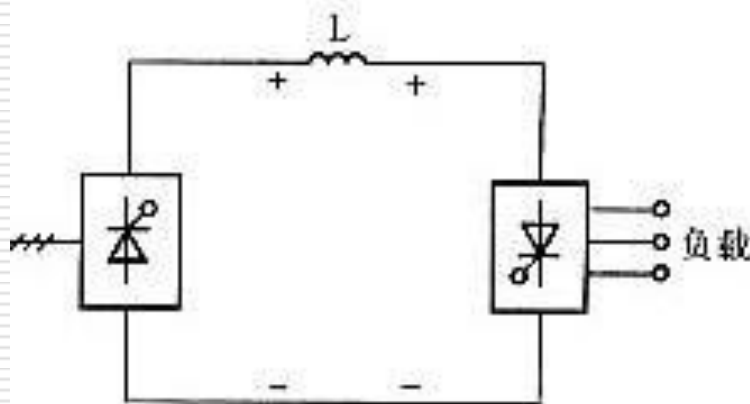
电压型变频器的电路框图



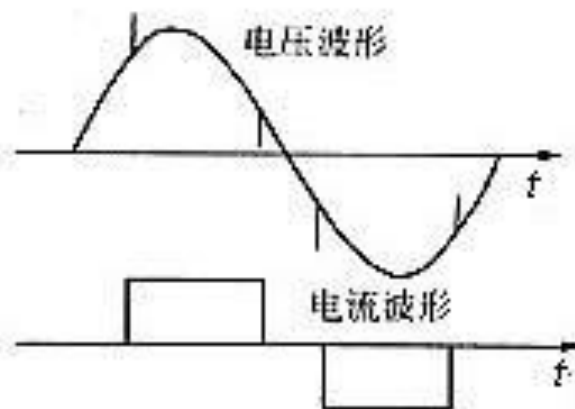
电压型变频器的电压和电流波形

## (2) . 电感滤波

采用大容量电感对整流电路输出电流进行滤波，称为电感滤波。由于经电感滤波后加于逆变器的电流值稳定不变，所以输出电流基本不受负载的影响，电源外特性类似电流源，因而称为电流型变频器。

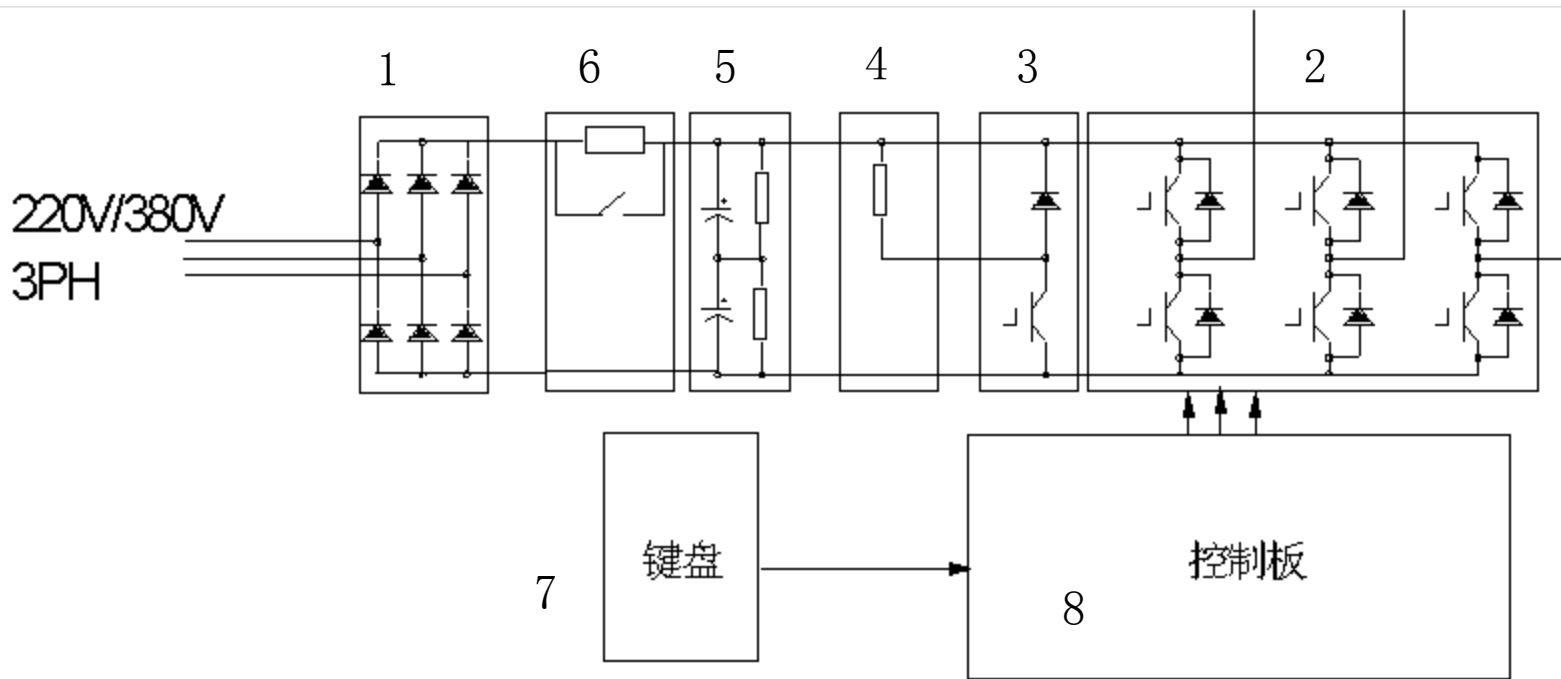


电流型变频器的电路框图



电流型变频器输出电压及电流波形

# 4、变频器的构成及工作原理——框图



类别		作用	主要构成器件
主回路	整流部分1	将工频交流变成直流，输入无相序要求	整流桥
	逆变部分2	将直流转换为频率电压均可变的交流电，输出无相序要求	IGBT
	制动部分3/4	消耗过多的回馈能量，保持直流母线电压不超过最大值	单管IGBT 和制动电阻, 大功率制动单元外置
	上电缓冲6	降低上电冲击电流，上电结束后接触器自动吸合，而后变频器允许运行	限流电阻和接触器
	储能部分5	保持直流母线电压恒定，降低电压脉动	电解电容和均压电阻
控制回路	键盘7	对变频器参数进行调试和修改，并实时监控变频器状态	MCU(单片机)
	控制电路8	交流电机控制算法生成，外部信号接收处理及保护	DSP(或两个MCU)

## 5、变频器的作用

---

- (1) 控制电动机的启动电流。
- (2) 降低电力线路电压波动。
- (3) 启动时需要的功率更低。
- (4) 可控的加速功能。
- (5) 可调的运行速度。
- (6) 可调的转矩极限。
- (7) 受控的停止方式。
- (8) 节能。
- (9) 可逆运行控制。
- (10) 减少机械传动部件。

---

## 四、变频器的控制方式： U/F控制、转差频率控制、矢量控制、直接转矩控制

## 三、变频器的控制方式

### 1、 $U/f$ 控制变频器

$U/f$ 控制变频器的方法是在改变频率的同时控制变频器的输出电压，通过使 $U/f$ （电压和频率的比）保持一定或按一定的规律变化而得到所需要的转矩特性。采用 $U/f$ 控制的变频器结构简单、成本低，多用于要求精度不是太高的通用变频器。

### 2、转差频率控制变频器

转差频率控制方式是对 $U/f$ 控制的一种改进。这种控制需要由安装在电动机上的速度传感器检测出电动机的转速，构成速度闭环。速度调节器的输出为转差频率，而变频器的输出频率则有电动机的实际转速与所需转差频率之和决定。由于通过控制转差频率来控制转矩和电流，与 $U/f$ 控制相比，其加减速特性和限制过电流的能力得到提高。

### 3、矢量控制变频器

矢量控制是一种高性能异步电动机控制方式，它的基本思路是将电动机的定子电流分为产生磁场的电流分量（励磁电流）和与其垂直的产生转矩的电流分量（转矩电流），并分别加以控制。由于在这种控制方式中必须同时控制异步电动机定子电流的幅值和相位，即定子电流的矢量，因此这种控制方式被成为矢量控制方式。

### 4、直接转矩控制变频器

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矢量来控制。其特点为转矩控制是控制定子磁链，并能实现无传感器测速。

# 为什么调频的同时要调压？



□ 通常变频调速叫**VVVF**,

□ **VVVF**——**Variable Voltage and Variable Frequency**, 即是调频调压调速。

□ 在调速的时候, 改变频率**F**的同时要相应的改变电压**V**, 使**V/F**成一定的比。

# 1、U / f控制

$U/f$ 控制是使变频器的输出在改变频率的同时也改变电压，通常是使 $U/f$ 为常数，这样可使电动机磁通保持一定，在较宽的调速范围内，电动机的转矩、效率、功率因数不下降。

## 1.1 $U/f$ 控制原理

由公式  $U_1 \approx E_1 \propto f_1 \Phi_M$

可知若 $U_1$ 没有变化，则 $E_1$ 也可认为基本不变。如果这时从额定频率 $f_N$ 向下调节频率，必将使 $\Phi_M$ 增加，即 $f_1 \downarrow \rightarrow \Phi_M \uparrow$ 。

由于额定工作时电动机的磁通已接近饱和， $\Phi_M$ 增加将会使电动机的铁心出现深度饱和，这将使励磁电流急剧升高，导致定子电流和定子铁心损耗急剧增加，使电动机工作不正常。可见，在变频调速时单纯调节频率是行不通的。为了达到下调频率时，磁通 $\Phi_M$ 不变，必须让

$$\frac{E_1}{f_1} = \text{常数}, \quad \text{即} \quad \frac{U_1}{f_1} = \text{常数}$$

## 补充：如何保持磁通 $\Phi$ 恒定？

$$E=4.44 *F* K* N* \Phi$$

**F** - 电机频率。

**N** - 每相绕组匝数

**$\Phi$**  - 电机气隙磁通

**K** - 与绕组有关的常数

保持E/F比值不变,则可保持磁通 $\Phi$ 恒定.

$$\Phi=E/(4.44*K*N*F)=K1*(E/F)$$

# 为什么要保持磁通恒定？

$$\Phi = E / (4.44 * K * N * f_1) \rightarrow \Phi = K_1 * (E / F)$$

- 从公式可以看出：如果减小**F**，而电源电动势**E**不变，那么**Φ**必然变大；（**F**减少，感抗变小，**I**增大）
- **1)**、因为电机的磁路设计都是按照一定的磁通量设计的，如果**Φ**增大→磁路进入了饱和状态→励磁电流过大→绕组过热→烧坏电机
- **2)**、磁通太弱-电机铁芯利用不充分，输出力矩下降
- 所以必须保证**Φ**为恒定，即保证**E/F**为一个常量。

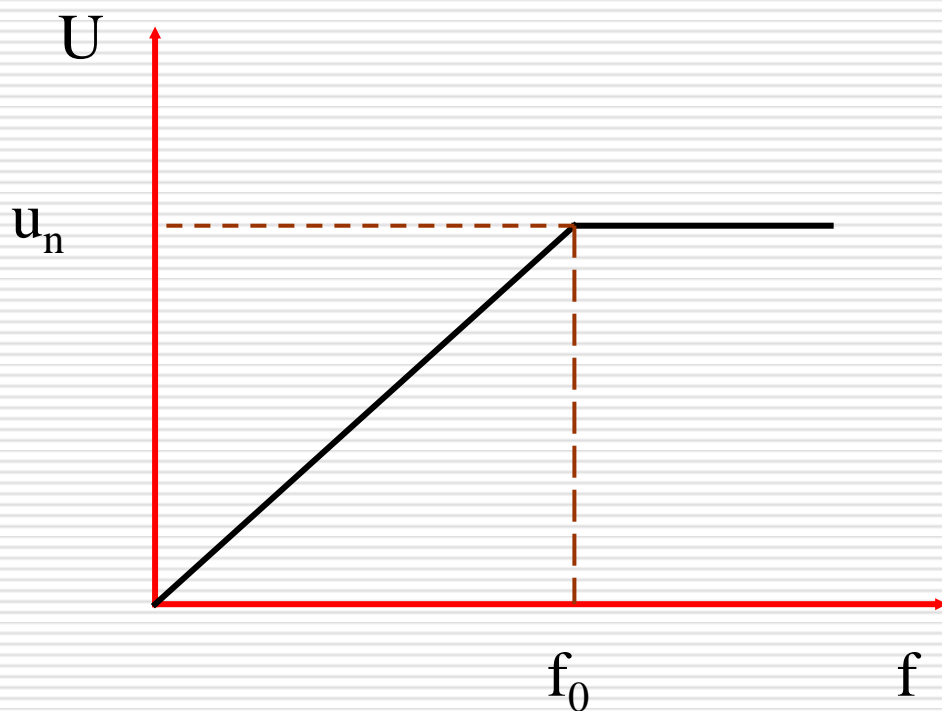
# 概括：保持磁通恒定的必要性(即E/F成比例)

- 综上：
  - **磁通太强**-电机励磁电流过大，损耗增加
  - **磁通太弱**-电机铁芯利用不充分，输出力矩下降
- 由于电动势**E**不方便测量，便把电动势**E**看作近似等于电压**U**，实际控制中，使**U/F**成比例变化。
- **E**和**U**不完全相等，在频率较高时，电动机定子阻抗压降所占比例较小，可近似认为**E=U**，

但是，在频率**F**较小时，**U**太低，此时电动机定子阻抗压降不能忽略，最终输出的转矩下降

∴ 需设定 $\Delta U \rightarrow$ 转矩提升（ $\Delta U$ 一般不超过 $U_e * 15\%$ ）

## V/F 控制的原则



当电动机的运行频率高于额定频率时，变频器的输出电压不再能随频率的上升而上升，在这种情况下，由于 $U/f$ 比将随频率的上升而下降，电动机磁路内的磁通也因此而减小，处于弱磁运行状态。因此，通常把转折点A称为弱磁点。

## □ V/F 控制的原则

□ 在额定频率以下调速 ( $f \leq f_N$ ) :

调节时保持**V/F**恒定 → 磁通 $\Phi$ 恒定 → 转矩恒定

□ 恒转矩

□ 在额定频率以上调速 ( $f > f_N$ ) :

**U**不能跟着上调，转速上升，转矩下降

□ 恒功率

## 小结

变频器的控制方式有： $U/f$ 控制、转差频率控制、矢量控制、直接转矩控制和单片机控制等。

$U/f$ 控制是使变频器的输出在改变频率的同时也改变电压，通常是使 $U/f$ 为常数，这样可使电动机磁通保持一定，在较宽的调速范围内，电动机的转矩、效率、功率因数不下降。

转差频率控制就是检测出电动机的转速，构成速度闭环，速度调节器的输出为转差频率，通过控制转差频率来控制转矩和电流，使速度的静态误差变小。

矢量控制是通过控制变频器输出电流的大小、频率及相位，用以维持电动机内部的磁通为设定值，产生所需的转矩。是一种高性能的异步电动机控制方式。

直接转矩控制是直接分析电动机的模型，控制电动机的磁链和转矩。

现在的变频器基本上都是以高性能单片机和数字信号处理器(DSP)等为控制核心构成的系统。专用于变频器控制的单片机的出现，使得系统的体积减小，功能及可靠性大大提高。

## 附：恒U / f控制方式的机械特性（简介）

### 1. 调频比和调压比

调频时，通常都是相对于其额定频率 $f_N$ 来进行调节的，那么调频频率 $f_x$ 就可以用下式表示：

$$f_x = k_f f_N$$

式中  $k_f$ ——频率调节比(也叫调频比)。

根据变频也要变压的原则，在变压时也有着调压比，电压 $U_x$ 可用下式表示：

$$U_x = k_u U_N$$

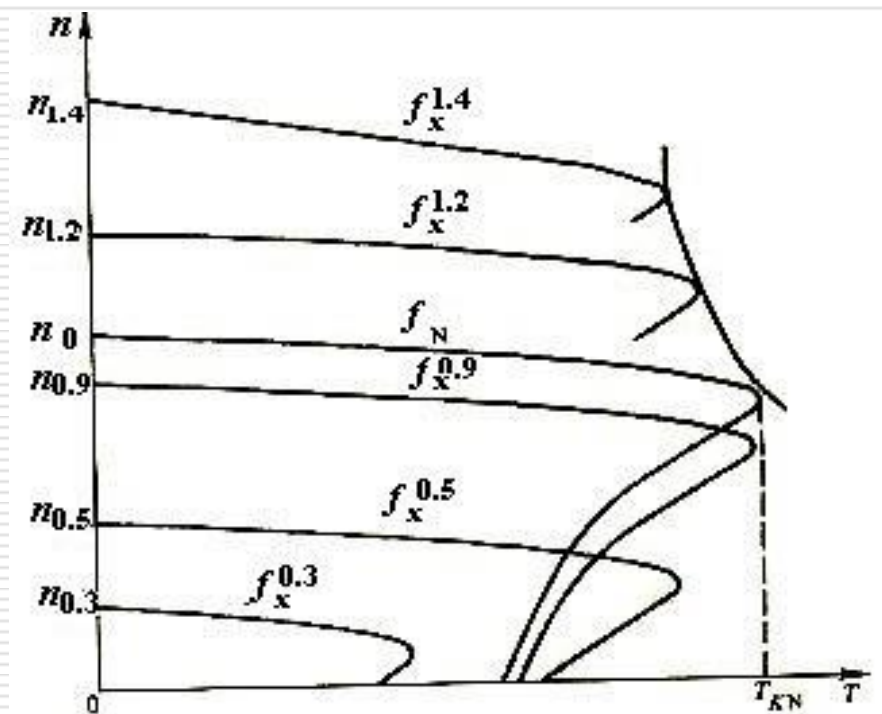
式中  $k_u$ ——调压比；

$U_N$ ——电动机的额定电压。

## 2. 变频后电动机的机械特性

机械特性曲线的特征如下：

- ① 从 $f_N$ 向下调频时， $n_{0x}$ 下移， $T_{Kx}$ 逐渐减小。
- ②  $f_x$ 在 $f_N$ 附近下调时：  
 $k_f = k_u \rightarrow 1$ ， $T_{Kx}$ 减小很少，  
 可近似认为 $T_{Kx} \approx T_{KN}$ ，  
 $f_x$ 调的很低时： $k_f = k_u \rightarrow 0$ ，  
 $T_{Kx}$ 减小很快。
- ③  $f_x$ 不同时，临界转差 $\Delta n_{Kx}$ 变化不是很大，所以稳定工作区的机械特性基本是平行的，且机械特性较硬。



## 1.3 对额定频率 $f_N$ 以下变频调速特性的修正

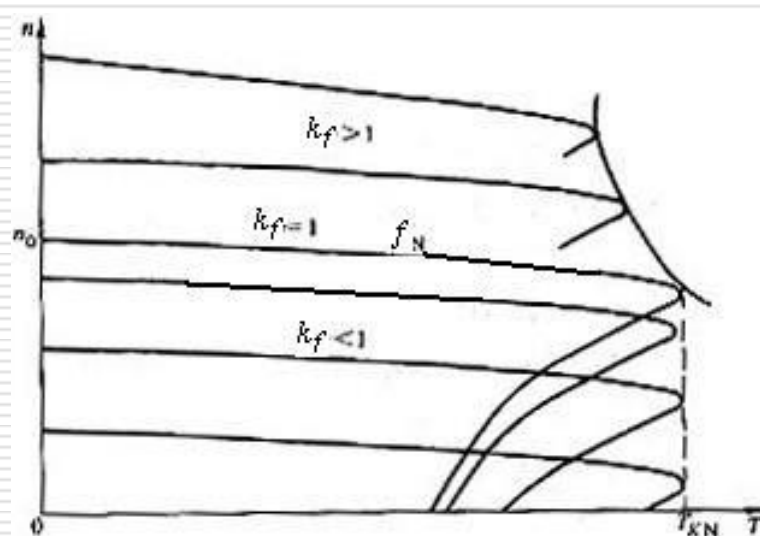
1) .  $T_{Kx}$  减小的原因分析

$$k_f \downarrow (k_u = k_f) \rightarrow \frac{\Delta U_x}{U_x} \uparrow \rightarrow \frac{E_x}{U_x} \downarrow \rightarrow \Phi_M \downarrow \rightarrow T_{Kx} \downarrow$$

2) . 解决的办法

适当提高调压比  $k_u$ ，使  $k_u > k_f$ ，即提高  $U_x$  的值，使得  $E_x$  的值增加。从而保证  $E_x/f_x = \text{常数}$ 。这样就能保证主磁通  $\Phi_M$  基本不变。最终使电动机的临界转矩得到补偿。

$f_x > f_N$  时，电动机近似具有恒功率的调速特性



$U/f$  采用电压补偿后机械特性

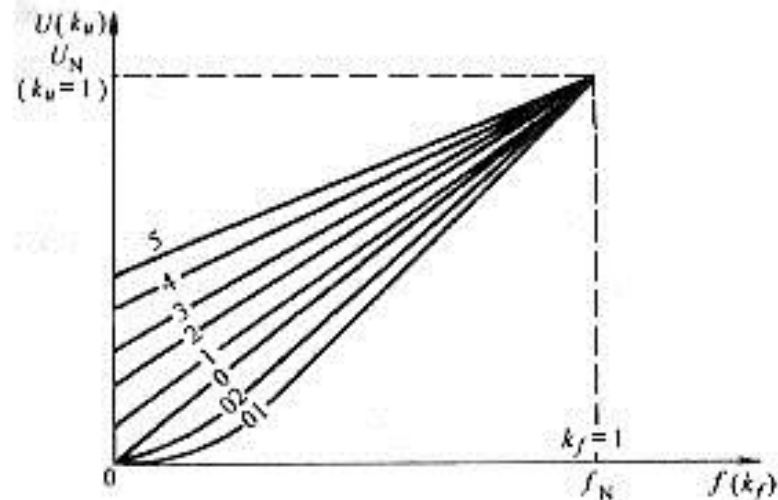
## 1.4 $U/f$ 控制的功能

### 1) . 转矩提升

转矩提升是指通过提高 $U/f$ 比来补偿 $f_x$ 下调时引起的 $T_{Kx}$ 下降。但并不是 $U/f$ 比取大些就好。补偿过分，电动机铁心饱和厉害，励磁电流 $I_0$ 的峰值增大，严重时可能会引起变频器因过电流而跳闸。

### 2) . $U/f$ 控制功能的选择

为了方便用户选择 $U/f$ 比，变频器通常都是以 $U/f$ 控制曲线的方式提供给用户，让用户选择的。



### 3) . 选择 $U/f$ 控制曲线时常用的操作方法

---

- (1) 将拖动系统连接好，带以最重的负载。
- (2) 根据所带的负载的性质，选择一个较小的 $U/f$ 曲线，在低速时观察电动机的运行情况，如果此时电动机的带负载能力达不到要求，需将 $U/f$ 曲线提高一档。依此类推，直到电动机在低速时的带负载能力达到拖动系统的要求。
- (3) 如果负载经常变化，在(2)中选择的 $U/f$ 曲线，还需要在轻载和空载状态下进行检验。方法是：将拖动系统带以最轻的负载或空载，在低速下运行，观察定子电流 $I_1$ 的大小，如果 $I_1$ 过大，或者变频器跳闸，说明原来选择的 $U/f$ 曲线过大，补偿过分，需要适当调低 $U/f$ 曲线。

---

**□ END**