

## 变频器

变频器是一种静止的频率变换器，可将交流电，作为电动机的电源装置，目前在提高产品质量和劳动生产率等。本课题介绍变频器常用开关器件（IGBT）、脉宽调制（PWM）变频器的应用。

LIMA

劉成

Sales Engineer

S.Z.Mobile:136-8239-6505

MSN:szlima@hotmail.com

QQ:778174600

AVAGO 光耦一级代理商

利瑪電子(新加坡)有限公司

Add:深圳市華強北電子科技大廈A座3908室

Tel:0755-8250 8350 Fax:0755-8836 4656

E-mail:lima@limaic.com

Website:www.limaic.com

Optocoupler  
World



### 一、本课题学习目标与要求

1. 了解变频器的发展和应用。
2. 掌握变频器的基本工作原理。
3. 初步熟悉变频器的参数设置。
4. 掌握 IGBT 器件的基本原理及常用的驱动保护电路的原理。
5. 掌握脉宽调制（PWM）型逆变电路工作原理。

### 二、主要概念提示及难点释疑

#### 1. 变频器的组成及工作原理

变频器通常由主电路、控制电路和保护电路组成。

主电路如图 6-1 所示。

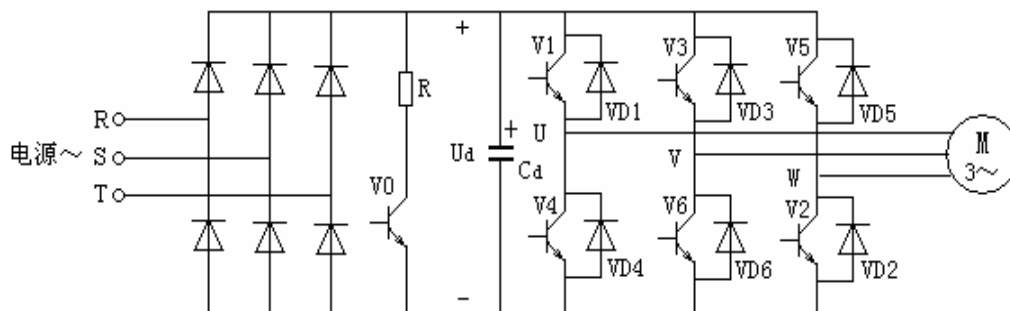


图 6-1 变频器主电路图

#### 2. 电压型和电流型变频器

电压型变频器和电流型变频器的区别仅在于中间直流环节滤波器的形式不同，但是这样一来，却造成两类变频器在性能上相当大的差异，主要表现列表 6-1 比较如下：

表 6-1 电压型变频器与电流型变频器的性能比较

特点名称	电压型变频器	电流型变频器
储能元件	电容器	电抗器
输出波形的特点	电压波形为矩形波 电流波形近似正弦波	电流波形为矩形波 电压波形为近似正弦波
回路构成上的特点	有反馈二极管 直流电源并联大容量电容（低阻抗电压源） 电动机四象限运转需要再生用变流器	无反馈二极管 直流电源串联大电感（高阻抗电流源） 电动机四象限运转容易
特性上的特点	负载短路时产生过电流 开环电动机也可能稳定运转	负载短路时能抑制过电流 电动机运转不稳定需要反馈控制

3. 绝缘门极晶体管（IGBT）

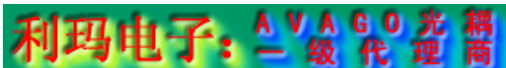
IGBT 的驱动原理与电力 MOSFET 基本相同，它是一种压控型器件。其开通和关断是由栅极和发射极间的电压  $U_{GE}$  决定的，当  $U_{GE}$  为正且大于开启电压  $U_{GE(th)}$  时，MOSFET 内形成沟道，并为晶体管提供基极电流使其导通。当栅极与发射极之间加反向电压或不加电压时，MOSFET 内的沟道消失，晶体管无基极电流，IGBT 关断。

4. 脉宽调制（PWM）型逆变电路

PWM 控制的基本原理：在采样控制理论中有一个重要结论：冲量（脉冲的面积）相等而形状不同窄脉冲（如图 6-22 所示），分别加在具有惯性环节的输入端，其输出响应波形基本相同，也就是说尽管脉冲形状不同，但只要脉冲在面积相等，其作用的效果基本相同。这就是 PWM 控制的重要理论依据。

5. 变频后异步电动机的机械特性

变频后异步电动机的机械特性如图 6—2 所示。



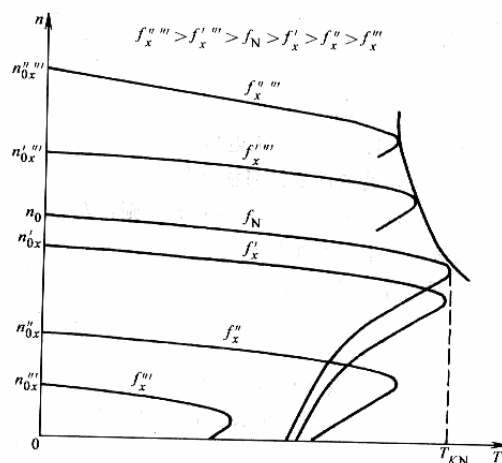


图 6-2

## 6. 变频器的控制方式

**V/F 控制：**是一种比较简单的控制方式。它的基本特点是对变频器的输出电压和频率同时进行控制，通过提高  $U/f$  比来补偿频率下调时引起的最大转矩下降而得到所需的转矩特性。采用 V/F 控制方式的变频器控制电路成本较低，多用于对精度要求不太高的通用变频器。

**转差频率控制方式：**是一种对 V/F 控制的一种改进。在采用这种控制方式的变频器中，电动机的实际速度由安装在电动机上的速度传感器和变频器控制电路得到，而变频器的输出频率则由电动机的实际转速与所需转差频率的和自动设定，从而达到在进行调速控制的同时，控制电动机输出转矩的目的。

**矢量控制的基本思想：**是将异步电动机的定子电流在理论上分成两部分：产生磁场的电流分量（磁场电流）和与磁场相垂直、产生转矩的电流分量（转矩电流），并分别加以控制。

## 三、学习方法

**1. 类比法：**变频后机械特性与调压、变极、转子回路串电阻等调速后机械特性类比起来学习；IGBT 与 MOSFET 类比；电压型和电流型类比。

**2. 定性分析法：**机械特性、V/F 控制可采用将问题具体化来分析。如：机械特性找几个特殊的点，描出曲线的大致轮廓再进行分析。

3. **理论联系实际法：**将身边应用变频器的实例联系起来理解和分析。
4. **讨论分析法：**读者要学习与他人讨论分析问题，并了解其他读者的学习方法和学习收获，提高学习效率。
5. **问题法：**提出相关问题，通过查找资料或询问同学、老师解决问题，达到知识的提升。

#### 四、典型题解析

**例 6—1** IGBT 在实际应用中要采取哪些保护措施？

**解：**(1) 过流保护：通过检测出的过电流信号切断门极信号，使 IGBT 关断。

(2) 过压保护：设置吸收电路可抑制过电压并限制电压上升率。

(3) 过热保护：利用温度传感器检测出 IGBT 的壳温，当超过允许值时令主电路跳闸。

**例 6—2** KGPS—1000—1.0 型中频电源，要求最大直流电流为 250A，最大直流电压为 510V。

试求：

- (1) 换向重叠时间。
- (2) 触发引前时间。
- (3) 中频电流、电压和输出功率。
- (4) 选择逆变晶闸管。

**解：**(1) 换向重叠时间的  $t_v$  计算

近似认为换向期间电流线性变化，则

$$\frac{di_T}{dt} = \frac{I_d}{t_r}, \quad t_r = \frac{I_d}{di_T / dt}$$

若管子允许电流上升率  $di/dt=20A/\mu s$ ，最大直流电流以 250A 计算，则

$$t_r = \frac{250}{20} = 12.5\mu s$$

与 1000Hz 中频周期  $T=1000\mu s$  相比，可忽略换流时间，近似认为电流是矩形波。

(2) 触发引前时间  $t_f$  的计算

取快速晶闸管的关断时间  $t_q$  为  $65 \mu s$ ， $K$  取 1.5，得

$$t_f = t_v + K t_q = 12.5 \mu s + 1.5 \times 65 \mu s = 110 \mu s$$

其对应的功率因数角  $\phi = 37.3^\circ$ ，实际上工作在  $40^\circ$  左右。

(3) 中频电流、电压和输出功率的计算

忽略换相重叠时间  $t_v$ ，则中频负载电流  $i_a$  为交变矩形波，用傅氏级数展开可得

$$i_a = \frac{4}{\pi} I_d (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots)$$

上式中基波电流有效值为

$$I_{a1} = \frac{4}{\pi} I_d / \sqrt{2} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d$$

忽略逆变电路的功率损耗，则逆变电路输入的有功功率即直流功率等于输出的基波功率（高次谐波不产生有功功率）即  $P_a = U_d I_d = U_a I_a \cos \phi$ ，将式代入可得

$$U_d I_d = U \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d \cos \phi$$

$$U_a = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{U_d}{\cos \phi} = \frac{1.11}{\cos \phi} U_d$$

所以

若  $t_f$  整定在  $110 \mu s$ ，对应  $\cos \phi = 0.79$ ， $U_{dM}$  以 500V 计算，代入式得到最大中频电压

$$U_{dM} = \frac{1.11 \times 500}{0.79} = 703V$$

中频输出功率为

$$P_a = \frac{U_a^2}{R_f}$$

式中  $R_f$ ——对应于某一逆变角  $\phi$  时，负载阻抗的电阻分量。

将式代入上式，得到

$$P_a = 1.23 \frac{U_d^2}{\cos^2 \phi} \cdot \frac{1}{R_f}$$

由上式可见，调节直流电压  $U_d$  或改变逆变角  $\phi$ ，都能改变中频输出功率的大小。

#### (4) 逆变晶闸管的计算

中频最大有效电压  $U_a$  以 750V 计，逆变晶闸管额定电压为

$$U_{Tn} = (1.5 \sim 2)\sqrt{2}U_a \approx 1600 \sim 2120V$$

通常选用 1800V 的 KK 型快速晶闸管，或用两只 1000V 晶闸管串联并采取均压措施。

额定电流  $I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2)\frac{I_T}{1.57}$ ，由于逆变桥中电流为矩形波，所以， $I_T = 0.707I_{dM}$ ，

电流选用 200A，管子型号为 KK200-18。

**例 6—3** 某负载，阻转矩为  $89N \cdot m$ ；要求转速为  $375r/min$ ；消耗功率为  $3.5kW$ 。选用 4 极异步电动机，试比较在不同传动比下，所需电动机的容量。

假设电动机具有硬特性，即  $n_{MN} \approx n_{M0} = 1500r/min, s \approx 0$

**解：**(1)  $\lambda = 1$

1) 电动机的转速及工作频率

转速：因为  $\lambda = 1$ ，所以：

$$n_{MX} = n_L = 375r/min$$

工作频率因为  $P=2$ 、 $s=0$ ，所以：

$$f_X = \frac{Pn_{MX}}{60} = 12.5Hz$$

2) 电动机的转矩

因为  $\lambda = 1$ ，所以：电动机轴上的转矩等于负载的阻转矩：

$$T_{MN} = T_L = 89N \cdot m$$

3) 电动机的容量

$$P_{MN} = 13.98kW$$

选用的  $P_{MN} = 15kW$  电动机，比负载功率大了 4.28 倍。

(2)  $\lambda = 2$

### 1) 电动机的转速及工作频率

转速：因为  $\lambda = 2$ ，所以：

$$n_{MX} = n_L' = 375 \times 2 = 750 r / \min$$

工作频率因为  $P=2$ 、 $s=0$ ，所以：

$$f_X = \frac{P n_{MX}}{60} = 25 Hz$$

### 2) 电动机的转矩

因为  $\lambda = 2$ ，所以：电动机轴上的转矩等于负载的阻转矩：

$$T_{MN} = T_L' = 89 / 2 = 44.5 N \cdot m$$

即电动机轴上所需转矩减小了一半，但仍比负载功率大 2.14 倍。

### 3) 电动机的容量

$$P_{MN} = \frac{44.5 \times 1500}{9550} = 7.0 kW$$

选用的  $P_{MN}=7.5kW$  电动机，可见，当传动比加大为 2 时，所需电动机的容量减小了一半。

## (3) $\lambda = 4$

### 1) 电动机的转速及工作频率

转速：因为  $\lambda = 4$ ，所以：

$$n_{MX} = n_L' = 375 \times 4 = 1500 r / \min$$

工作频率 明显的是，因为电动机的转速等于额定转速，所以，其工作频率也必等于额定频率：

$$f_X = f_N = 50 Hz$$

### 2) 电动机的转矩

因为  $\lambda = 4$ ，所以：电动机轴上的转矩等于负载的阻转矩：

$$T_{MN} = T_L' = 89 / 4 = 22.25 N \cdot m$$

即电动机轴上所需转矩又减小了一半

### 3) 电动机的容量

$$P_{MN} = \frac{22.25 \times 1500}{9550} = 3.5kW$$

选用的  $P_{MN}=3.7kW$  电动机。可见，所需电动机的容量又减小了一般，与负载功率吻合。这已经是最优化的结果了，从能量的角度看，电动机容量已不可能再减小。

### (4) $\lambda = 8$

#### 1) 电动机的转速及工作频率

转速：因为  $\lambda = 8$ ，所以：

$$n_{MX} = n_L' = 375 \times 8 = 3000r/min$$

工作频率

$$f_x = \frac{Pn_{MX}}{60} = 100Hz$$

#### 2) 电动机的转矩

因为  $\lambda = 8$ ，所以：电动机轴上的转矩等于负载的阻转矩：

$$T_{MN} = T_L' = 89/8 = 11.125N \cdot m$$

但是当电动机的工作频率超过额定频率一倍时，其有效转矩将减小一半。换言之，电动机的额定转矩时有效转矩的二倍：

$$T_{MN}=2T_{MX}=22.5Nm$$

和  $\lambda = 4$  相比较，电动机所需转矩并未减小。

### 3) 电动机的容量

因为电动机的额定转速和额定转矩都和  $\lambda = 4$  时相同，故所选电动机的容量也一样：

选用的  $P_{MN}=3.7kW$  电动机。

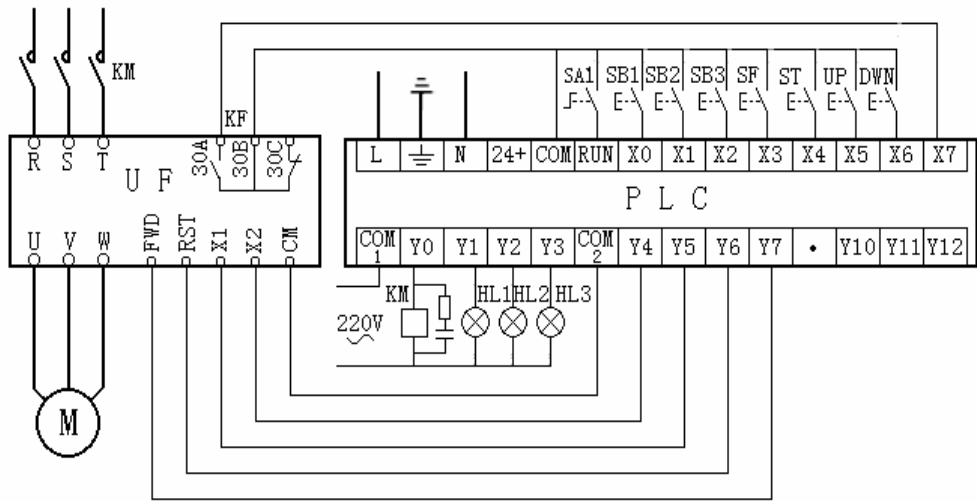
可见，继续增大传动比，不再能减小电动机的容量宁嘎，反而增加了设备投资和传动机构的损失。

**例 6—4** 某正转的变频调速系统，要求用 PLC 进行控制，试画出该系统的电路图、

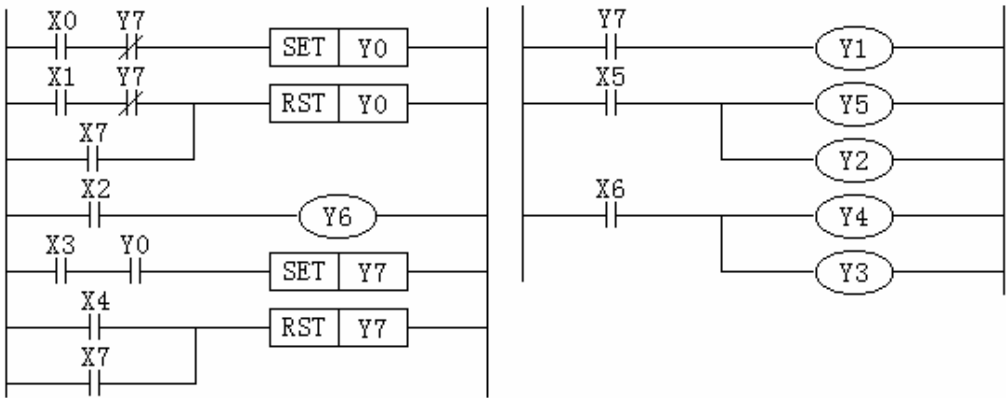


梯形图。

解：该系统的电路图如图 6-3（a）所示。梯形图如图 6-3(b)所示。



(a)



(b)

图 6-3 例 6-4 图

## 五、自我检测题

### 1. 填空题

1) 请在正确的空格内标出下面元件的简称：

绝缘栅双极型晶体管\_\_\_\_\_；IGBT 是\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_的复合管。

2) PWM 逆变电路的控制方法有\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_三种。其中

调制法又可分为\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_两种。

3) 对异步电动机实施变频调速控制, 通常的控制方式有\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_等四种。

4) 目前常用的具有自关断能力的电力电子元件有\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_几种。

5) 绝缘栅双极型晶体管是以\_\_\_\_\_作为栅极, 以\_\_\_\_\_作为发射极与集电极复合而成。

6) SPWM 脉宽调制型变频电路的基本原理是: 对逆变电路中开关器件的通断进行有规律的调制, 使输出端得到\_\_\_\_\_脉冲列来等效正弦波。

## 2. 判断题

1) 变频调速实际上是改变电动机内旋转磁场的速度达到改变输出转速的目的。

( )

2) 变频调速装置是属于无源逆变的范畴。

( )

3) 电压型逆变电路, 为了反馈感性负载上的无功能量, 必须在电力开关器件上反并联反馈二极管。

( )

4) 变频器总是把直流电能变换成 50Hz 交流电能。

( )

5) PWM 脉宽调制型逆变电路中, 采用不可控整流电源供电, 也能正常工作。

( )

## 3. 选择题

1) SPWM 控制的逆变电路, 输出 SPWM 波半周期包含 25 个脉冲波, 设逆变器输出电压基波频率为 400Hz, 则电路中开关管的工作频率为 \_\_\_\_\_。

A、10kHz    B、20 kHz    C、400Hz    D、5 kHz

2) 电压型逆变电路特点有 \_\_\_\_\_。

A、直流侧接大电感    B、交流侧电流接近正弦波

C、直流侧电压无脉动    D、直流侧电流无脉动

3) 下面哪种功能不属于变流的功能 ( )

A、有源逆变    B、交流调压    C、变压器降压    D、直流斩波

#### 4. 问答题

- 1) 6 台电动机能否共用一台变频器？怎样选择变频器的容量？
- 2) PWM 逆变电路的控制方法主要有哪几种？简述异步调制与同步调制各有哪些优缺点？
- 3) 电压型逆变电路中反馈二极管的作用是什么？为什么电流型逆变电路没有反馈二极管？
- 4) 能否通过减小传动比来提高负载的转速？
- 5) 某机械，电动机容量为 3.7kW，额定转速为 1440r/min。齿轮箱调速，最低转速为 120 r/min。今不要齿轮箱，直接通过变频器来调速，行不行？为什么？

#### 5. 画图题

某变频器，采用 PLC 进行多档转速控制，画出系统的电路图和梯形图。

### 六、自我检测题答案

#### 1. 填空题

- 1) IGBT、GTR、MOSFET
- 2) 计算法，调制法，跟踪控制法。异步调控法，同步调控法
- 3) 恒压频控制，转差频率控制，矢量控制，直接转矩控制
- 4) GTO；GTR；MOSFET；IGBT
- 5) 电力场效应晶体管栅极为栅极；以电力晶体管集电极和发射极
- 6) 一系列幅度相等，脉宽与正弦波幅值成正比的

#### 2. 判断题

- 1) √    2) √    3) √    4) ×    5) √

#### 3. 选择题

- 1) B    2) BC    3) C

#### 4. 问答题

- 1) 可以使用。关于变频器容量的选择，分两种情况：
- (1) 6 台电动机同时启动

在这种情况下，变频器的容量只需 6 台电动机的总容量选择即可。

## (2) 6 台电动机分别启动

则后启动的电动机有可能在最高频率下直接启动，如最高频率为额定频率，则启动电流高达额定电流的（4~7）倍。变频器的额定电流大致按下式计算：

$$I_N \geq \sum_{n=1}^{n=5} I_{MN} + (4 \sim 7) I_{Mn \max}$$

式中  $\sum_{n=1}^{n=5} I_{MN}$  ——除最大容量电动机外的 5 台电动机的总容量，kW。

$I_{Mn \max}$  ——最大容量电动机的额定电流。

2) PWM 逆变电路的常用控制方法有两种，一是计算法；二是调制法。其中调制法又可分为两种，一是异步调制法；二是同步调制法。通常异步调制法是保持载波频率不变，信号频率根据需要而改变时，载波比是变化的。优点是：信号频率较低时载波比较大，一周期内脉冲数较多，输出较接近正弦波。缺点是：正负半周脉冲数不相等，对称性差。因此，希望采用较高的载波频率，以克服在信号频率较高时仍能保持较大的载波比。同步调制时，保持载波比为常数，并在变频时使载波和信号波保持同步变化。优点是：信号波一周内输出的脉冲数是固定的，脉冲相位也是固定的，对称性好。缺点是：当逆变频率较低时，载波频率也很低，造成调制谐波不易滤除；逆变频率较高时，调制载波频率也过高，使开关器件的开关频率过高而难以承受。

3) 电压型逆变器当交流侧为阻感性负载时，需要向电源反馈无功功率。直流侧电容起缓冲无功能量的作用。为了给交流侧向直流侧反馈的无功能量提供通道，逆变桥各臂开关器件都反并联了反馈二极管。

而对电流型逆变器来说，当交流侧为阻感负载时，也需要提供无功能量反馈，但直流侧电感起缓冲无功能量的作用，因反馈无功能量时，直流电流并不反向，因此不必象电压型逆变器那样要给开关器件反并联二极管。

## 4) 这个问题可以从两个方面来说明：

### (1) 从能量角度看

在负载转矩不便的情况下，如提高转速，则由于：
$$P_L = \frac{T_L \cdot n_L}{9550}$$
 所以，负载所需功率将增大，如果电动机的容量不增大的化，必将带不动负载。

## (2) 从转矩的角度看

传动比减小后，如果电动机的额定转矩未变，则负载侧的转矩将减小，结论和上述的相同，电动机将带不动负载。

5) 如果不要齿轮箱，电动机和负载之间的传动比减小，电动机试带不动负载的。但是，如果不要齿轮箱后，电动机和负载之间加入一个减速装置的化，则试可以通过变频器来调速的。

## 5. 画图题

