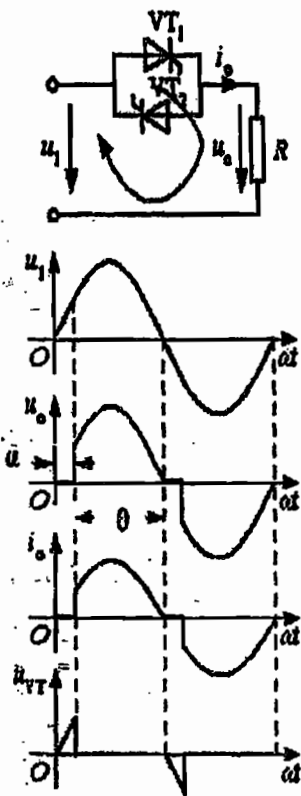


电力电子技术 复习重点

第六章 交流-交流电路

1. 分为2类, 交流电力控制电路(只控制通断, 不改变频率)+变频电路

2. 单相交流调压电路(纯电阻)



$$\textcircled{1} U_o = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2} U_1 \sin \omega t)^2 d(\omega t)}$$

$$= U_1 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (\text{对比单相桥式整流 } I_{VT} \text{ 公式})$$

$$I_o = \frac{U_o}{R}$$

晶闸管电流有效值 $I_{VT} = \frac{I_o}{\sqrt{2}}$

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{U_o I_o}{U_1 I_o} = \frac{U_o}{U_1}$$

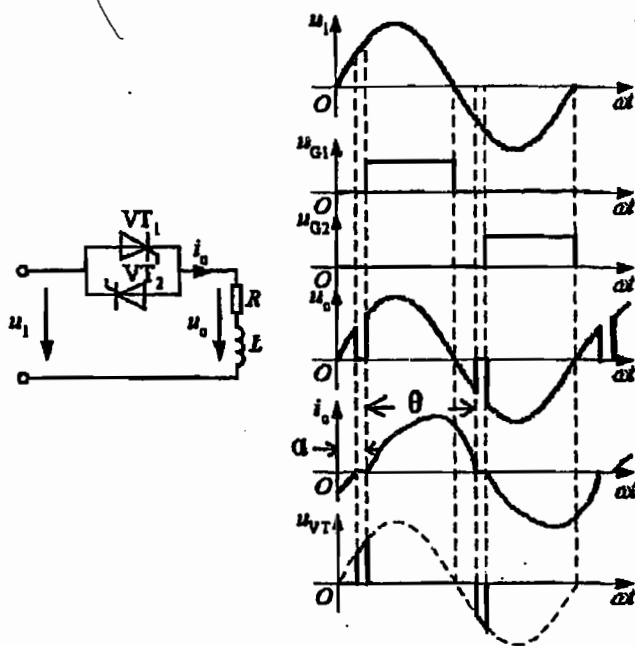
② 功率因数小于1, 考虑到有断的情况(对比正弦电路中, 纯电阻的功率应该始终为1)

③ 导通角与触发延迟角的关系:

$$\theta = 180 - \alpha$$

3. 单相交流调压电路(阻感)

$$\text{当 } \phi = 0, \lambda = 1$$

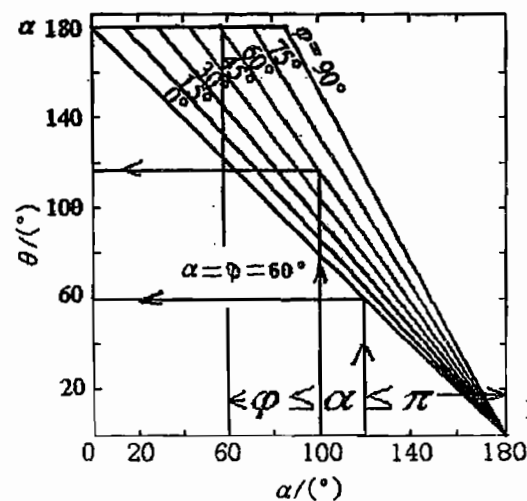


① 因为电感 Hold 住电流的原因, 输出电压有负值

② 输出电压公式太复杂不用记

③ 移相范围是: $\phi \leq \alpha \leq \pi$, α 如果小于 ϕ 的话输出电压最后就变正弦了, 此时工作不正常, 无法调压

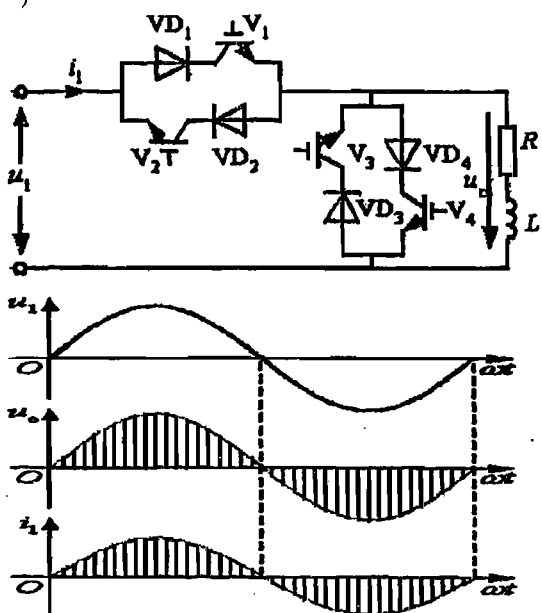
④



著名的图出自于此, 图上也能看到, 当 α 小的时候管子就 180 度全部导通了 $\theta = \frac{180 - \alpha}{180 - \phi} \times 180^\circ$

3.1 谐波: 只有奇次没有偶次谐波。

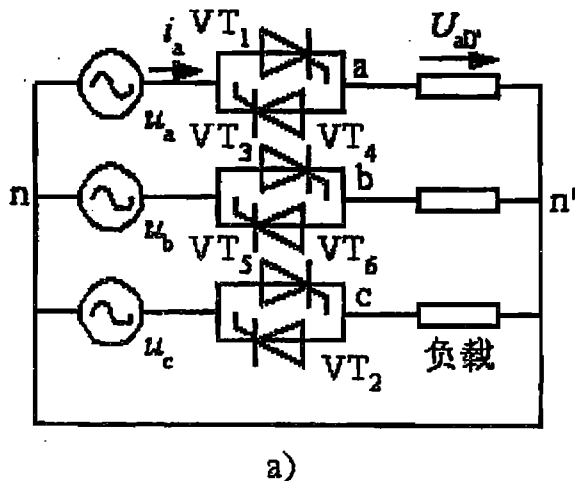
4. 斩控式调压电路



优点：无低次谐波。

缺点：全控器件，耐压及通流能力低，结构复杂。

5. 三相交流调压电路（只研究电阻负载！！）



①基波和3倍次以外的谐波电流不流过零线，
 $i_{An} + i_{bn} + i_{cn} = 0$ 在三相之间流动，不流过零线

②三次谐波电流同相位同幅值，相当于一个交流电源，
 三相线的三次谐波电流均要流过零线。

③ $\alpha = 90^\circ$ 时，3倍次谐波电流全部流过零线，甚至
 和各相电流有效值相近。

④具体导通波形十分复杂，但要记住以下三种情况

以电压过零为触发延迟角 α 的起点，移相范围是0到150度。

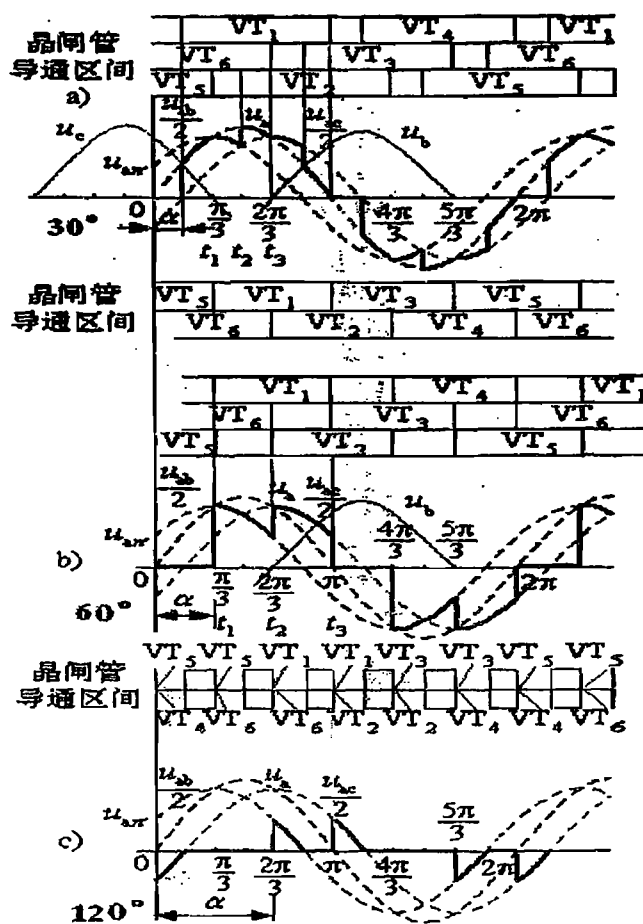
波形分析要按同时有几个管子导通。三个：负载相电压=电源相电压；两个：负载相电压=电源线电压一半；均不导通：电压为0。

减小延迟角，则导通时间加长，管子同时导通的可能性大；增大延迟角，同时导通的管子数量减少

a. $0 \sim 60^\circ$ 度，3+2（有时三管通有时两管）

b. $60 \sim 90^\circ$ 度，2（一直是两个管子通）

c. $90 \sim 150^\circ$ 度，2+0



a) $0^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ 时 每管导通 $180^\circ - \alpha$

b) $60^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ 时 每管导通 120°

c) $90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$ 时 每管导通 $300^\circ - 2\alpha$

⑤谐波：只有奇次谐波但不含3的整数倍次

6. 交流调功电路

① 适用于时间常数很大的电路如电炉。

7. 交流电力电子开关

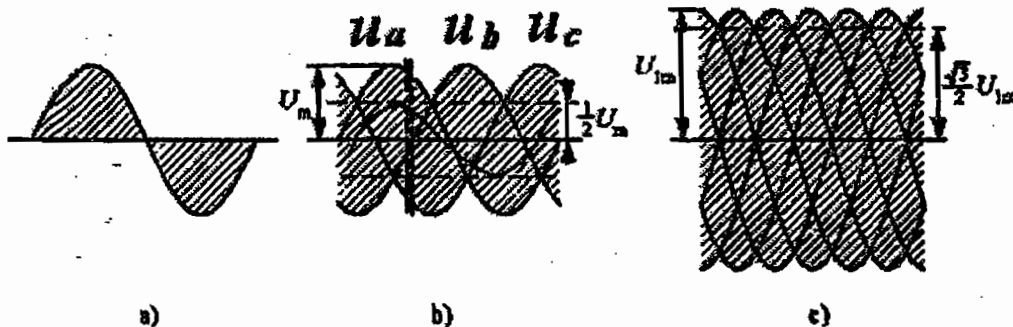
作用：代替机械开关，起接通和断开电路的作用

优点：响应速度快，无触点，寿命长，可频繁控制通断

与交流调功电路的区别：并不控制电路的平均输出功率；通常没有明确的控制周期，只是根据需要控制电路的接通和断开；控制频率通常比交流调功电路低得多；时间上精细度：交流调压 > 交流调功电路 > 电力电子开关 > 机械开关

8. 矩阵式变频电路

① 进行斩波控制



② 利用三相相电压：利用三相相电压包络线中所有的阴影部分，理论上所构造的 u_u 的频率可不受限制，其最大幅值仅为输入相电压 u_a 幅值的 0.5 倍，如 u_u 为正弦波，则峰值为 $0.5 u_u$

③ 利用三相线电压：图中第一行和第二行的 6 个开关共同作用来构造输出线电压 u_{uv} ，可利用 6 个线电压包络线中所有的阴影部分，最大幅值就可达到输入线电压幅值的 0.866 倍，当 u_{uv} 须为正弦波时，则峰值为 $0.866 u_{ab}$ ，这是正弦波输出条件下矩阵式变频电路理论上最大的输出输入电压比

④ 优点：1) 有十分理想的电气性能，输出电压和输入电流均为正弦波，功率因数为 1。

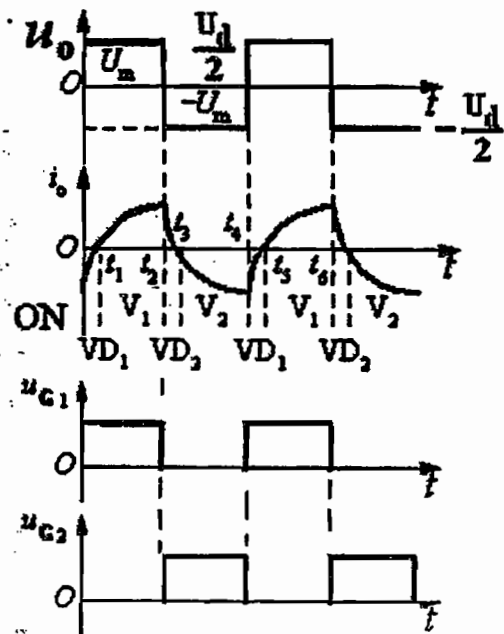
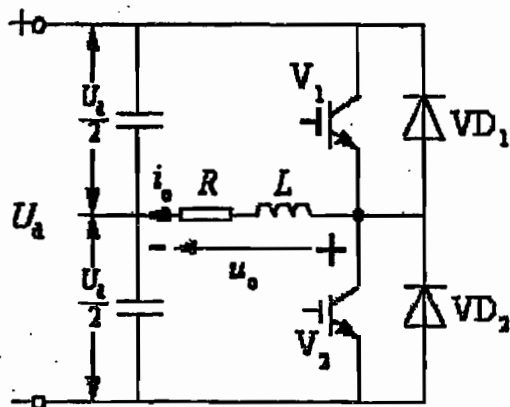
2) 和目前广泛应用的交直交变频电路相比（用 6 个整流，6 个逆变），虽多用了 6 个开关器件（矩阵式变频电路用 18 个-12 个=6 个），却省去了直流侧大电容，将使体积减小，且容易实现集成化和功率模块化

⑤ 缺点：1) 所用的开关器件为 18 个，电路结构较复杂，成本较高，控制方法还不算成熟

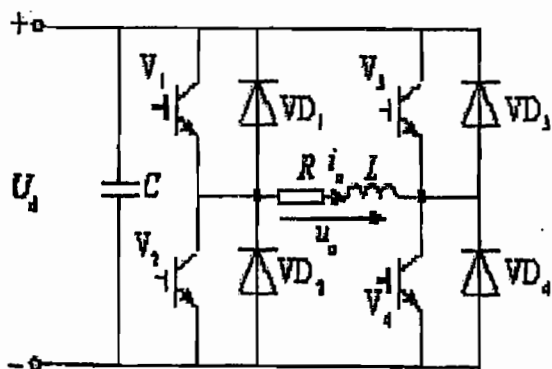
2) 输出输入最大电压比只有 0.866，用于交流电机调速时输出电压偏低

第四章 逆变电路

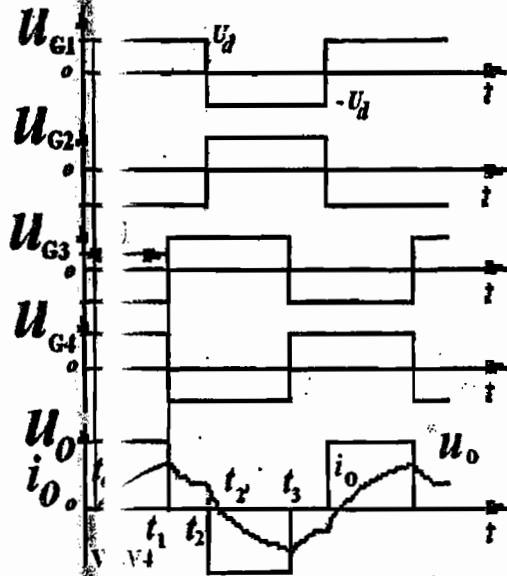
1. 单相半桥逆变电路



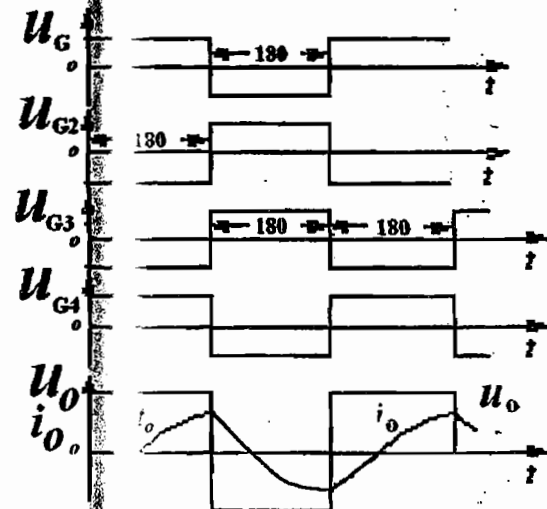
2. 单相全桥逆变电路



带移相的压方式: V3 的出发不是比 V1 落后 180, 而是 $180-\theta$



不带移相:



① 谐波分

波形正负

半周期镜对称, 无偶次谐波,

波形在半
无余弦项

期内前后 1/4 周期. 以 $\pi/2$ 为轴线对称,

$$u_o = \frac{4U_d}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right)$$

(无移相)

出方波, 此为方波展开 (半桥换成 $U_d/2$)

$$U_{olm} = \frac{4U_d}{\pi}$$

(基波幅值)

$$1.27U_d > U_d$$

$$U_{ol} = \frac{2\sqrt{2}U_d}{\pi} = 0.9U_d$$

(基波有效值)

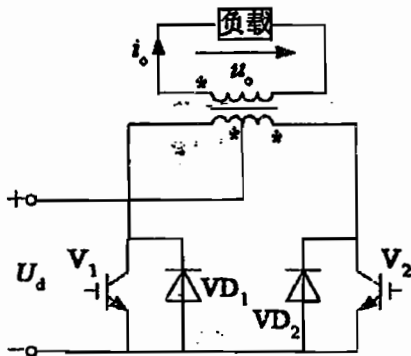
0.2jw
0.2w

②调压范围 $0 \leq \theta \leq 180$

增大 θ 可以增大输出电压 $u_o = \frac{\theta}{180} U_d$

3. 带中心抽头变压器的逆变电路

交替驱动两个 IGBT，经变压器耦合给负载加上矩形波交流电压，两个二极管的作用也是提供无功能量的反馈通道， U_d 和负载相同，变压器匝比为 1:1:1 时， u_o 和 i_o 波形及幅值与全桥逆变电路完全相同



比全桥电路少用一半开关器件

器件承受的电压为 $2U_d$ ，比全桥电路高一倍，必须有一个变压器

4. 换流方式

①器件换流：利用全控器件自关断能力进行的换流。

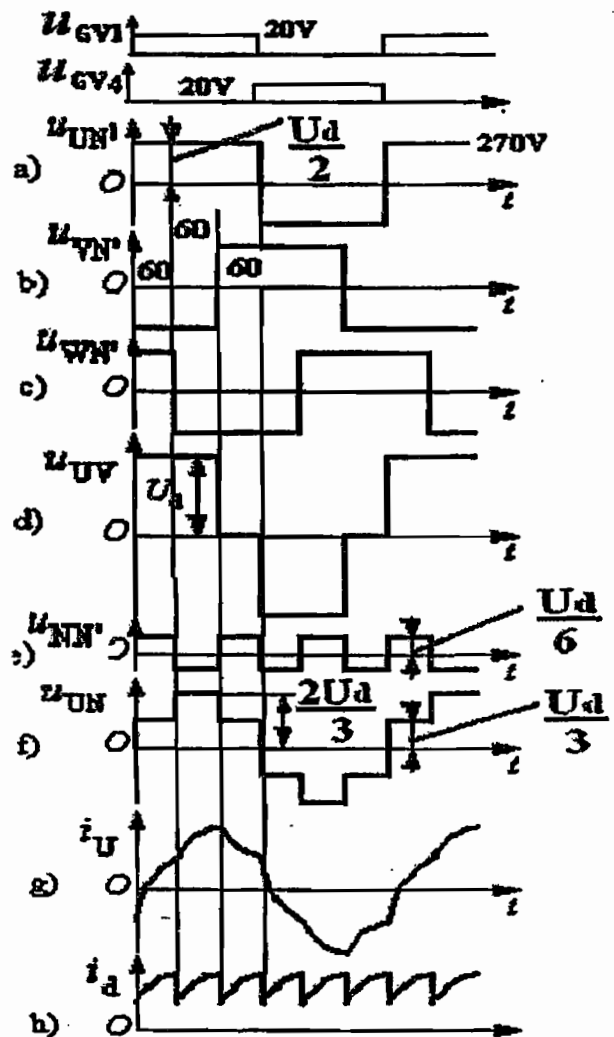
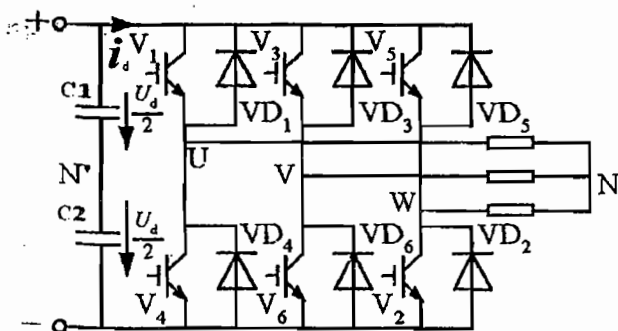
如 IGBT（电压型逆变电路中）

②电网换流：整流电路、调压电路

③负载换流

④强迫换流

5. 三相全桥电压型逆变电路



①导电方式：V1, V2, V3, V4, V5, V6 按顺序导通。每桥臂导电 180° ，同一相上下两臂交替导电，各相开始导电的角度差 120° 。任一瞬间有三个桥臂同时导通。每次换流都是在同一相上下两臂之间进行，也称为纵向换流

$$② \quad u_{NN'} = \frac{1}{3}(u_{UN'} + u_{VN'} + u_{WN'})$$

③谐波分析：对输出线电压 u_{UV}

a、波形正负两半周期镜对称，无偶次谐波，

b、波形在半周期内前后 $1/4$ 周期

以 $\pi/2$ 为轴线对称，无余弦项

c、无 3 次及 3 倍次谐波。有零电压区间，所以各系数有正有负。

输出线电压有效值 U_{UV} :

$$U_{UV} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} u_{UV}^2 d\omega t} = 0.816U_d$$

输出线电压基波幅值 U_{UV1m} 和有效值 U_{UV1}

$$U_{UV1m} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} U_d = 1.1U_d > U_d$$

$$U_{UV1} = \frac{U_{UV1m}}{\sqrt{2}} = 0.78U_d$$

输出相电压有效值 U_{UN} :

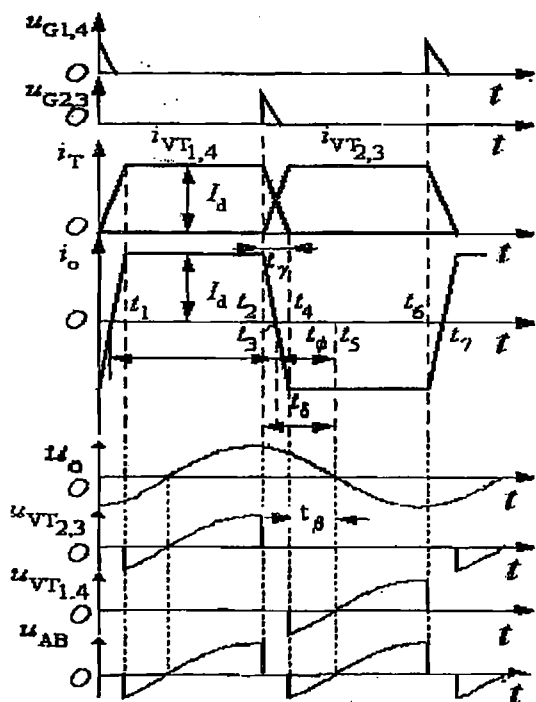
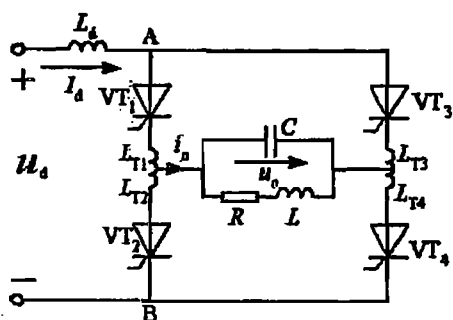
$$U_{UN} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} u_{UN}^2 d\omega t} = 0.471U_d$$

输出相电压基波幅值 U_{UN1m} 和有效值 U_{UN1}

$$U_{UN1m} = \frac{2}{\pi} U_d = 0.637U_d < \frac{2}{3}U_d$$

$$U_{UN1} = \frac{U_{UN1m}}{\sqrt{2}} = 0.45U_d$$

6. 单相电流型逆变电路



①输出电流：方波展开，和电压逆变相同

$$i_o = \frac{4I_d}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right)$$

②换流过程：假设1、4通时触发23，由于VT3, VT2导通，其电流线性增加；导致VT1, VT4电流线性减少。软着陆，逐渐交接

③可靠换流条件：a, VT1和VT4承受反压时间

$$t_p = t_s - t_d > \text{晶闸管关断时间 } t_q$$

b, 必须在电压过零前出发VT2和VT3，否则VT2和VT3就反偏了开不了

④自励与他励：负载参数改变，逆变电路工作频率也会改变。固定的工作频率不能保证正确逆变（可靠换流条件）。必须使工作频率能适应负载的变化而自动调整。这种方式成为自励方式，即触发信号取自负载端。与其对应的是他励方式。自励方式一开始没有信号可以取，所以启动的是后应先他励，再自励。

7. 三相电流逆变电路

不太懂... 看书看课件

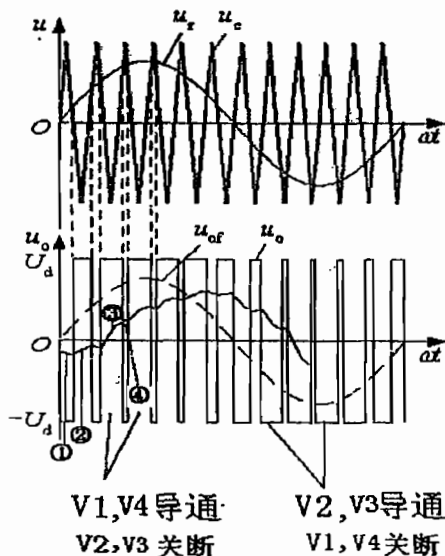
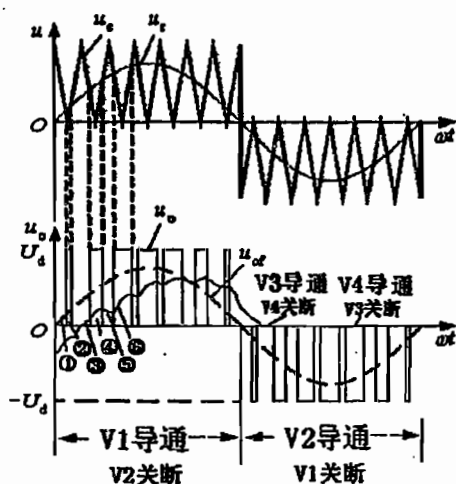
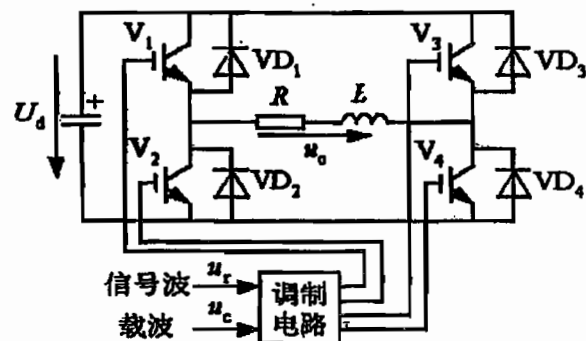
8. 电压电流逆变对比

电压型	电流型
直流侧电压源-电容滤波	直流侧电流源-电感滤波
同一相内上下桥臂间:纵向换流	同一组内不同相间:横向换流
上下桥臂采取先断后通	组内换相桥臂采取先通后断
-留“死区”防电压源短路	-留“续流区”防电流源开路
单相逆变每个臂导通时间稍小于180°	单相逆变每个臂导通时间稍大于180°
三相逆变每个臂导通时间稍小于180°	三相逆变每个臂导通时间稍大于120°
3个管子导通: 上2个与下1个或上1个与下2个	2个管子导通: 上1个与下1个
输出电压为方波, 电感滤波-电流稍近似正弦波(指数波)	输出电流为方波, 电容滤波-电压近似正弦波
主要使用全控器件-器件换流	主要使用半控器件-负载换流
要短路保护-否则烧管子-是难点	根据负载情况决定“自励”, “他励”-否则逆变失败-是难点

第七章 PWM 控制技术

1.模拟的最大效率：78.5%

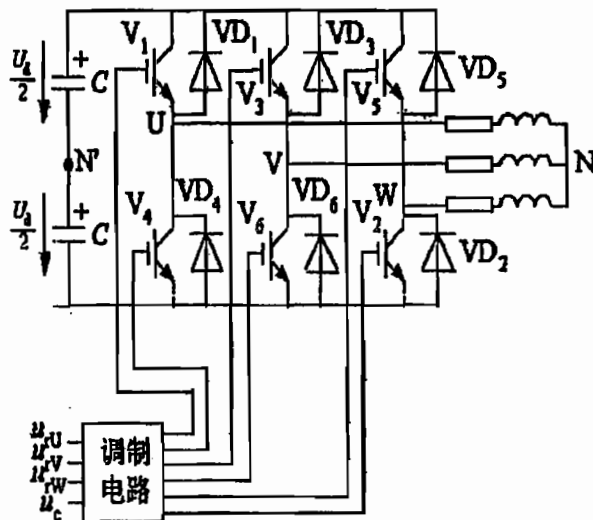
2.单相桥式 PWM 逆变电路



3.调制度调制度 $a = u_{rm}/u_{cm} \leq 1$

4.计算法 VS 调制法

5.三相桥式 PWM 逆变电路



原理与非 PWM 的三相桥式近似

输出相电压 PWM 波形由 $+U_d/2$ 和 0 组成。输出线电压 PWM 波形由 $+U_d$ 和 0 构成

负载 PWM 波形相电压因为要减去 $U_{nn}(U_d/6)$ 所以由 $+(2/3)U_d, +(1/3)U_d, 0$ 构成

输出相电压(不是 PWM 波)的基波幅值是 $U_d/2$ ，输出线电压的幅值是 $\sqrt{3}/2 U_d (0.866)$

6.计算法

自然采样法:按 SPWM 基本原理,要求解复杂的超越方程,难以在实时控制 中在线计算,工程应用不多。

规则采样法:工程实用方法,效果接近自然采样法,计算量小得多,

规则采样法中对于三相: $\delta_u + \delta_v + \delta_w = \frac{3T_c}{2}$

7.特定谐波消去法

输出电压四分之一一个周期内,去掉 0 和 π ,开通和关断各有 k 次 ($k=12/4=3$),根据以上 2 个条件,共有 k 个方程 ($k=3$),保留 1 个方程用于控制基波,

另 $k-1$ ($3-1=2$) 个方程可以消除 $k-1$ 次谐波 (2 个)

3. 计算法-规则采样法 (2)

$$\triangle ECF \sim \triangle ACD$$

$$\frac{DC}{AD} = \frac{FC}{EF}$$

$$\frac{1 + a \sin \omega_c t_D}{\delta/2} = \frac{2}{T_c/2}$$

$$\delta = \frac{T_c}{2} (1 + a \sin \omega_c t_D)$$

$$\delta' = \frac{1}{2} (T_c - \delta) = \frac{T_c}{4} (1 - a \sin \omega_c t_D)$$

对于三相:

$$\delta_u + \delta_v + \delta_w = \frac{3T_c}{2} + \frac{T_c}{2} a [\sin \omega_c t_D + \sin(\omega_c t_D + 120^\circ) + \sin(\omega_c t_D + 240^\circ)]$$

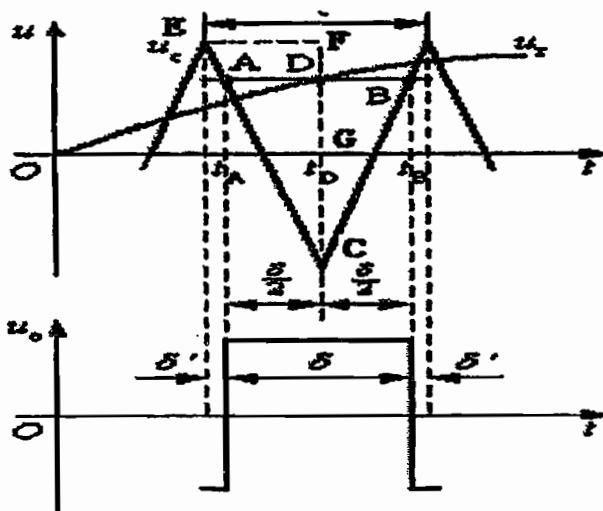
$$= \frac{3T_c}{2} + 0 = \frac{3T_c}{2}$$

$$\delta_u' + \delta_v' + \delta_w' = \frac{3T_c}{4} - \frac{T_c}{4} a [\sin \omega_c t_D + \sin(\omega_c t_D + 120^\circ) + \sin(\omega_c t_D + 240^\circ)]$$

$$= \frac{3T_c}{4}$$

20

8. 规则采样法计算

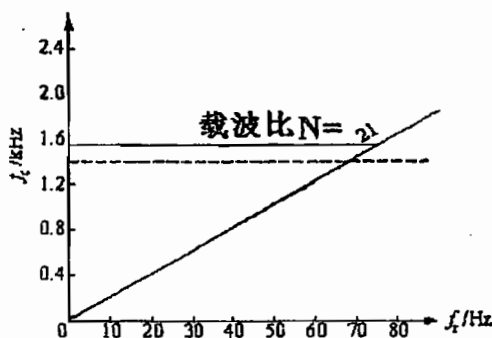


9. 异步调制 VS 同步调制

①同步调制: 载波信号 f_c 与调制信号 f_r 同步, 载波比: $N = f_c / f_r = \text{常数}$ 。在三相逆变电路中载波比 N 为 3 的倍数, 以使三相严格对称。 N 为奇数时 PWM 波半波镜对称, 半周期前后 1/4 周期对称。当 f_r 很低时 f_c 很低, 使电动机负载带来脉动和噪声, 当 f_r 很高时 f_c 很高, 使开关器件难以承受。

②异步调制: 载波信号 f_c 与调制信号 f_r 不同步, 通常 $f_c = \text{常数}$, 载波比: $N = f_c / f_r$ 是变数。(1)、控制简单。(2)、载波信号 f_c 与调制信号 f_r 不同步, $f_c = \text{常数}$, 载波比: $N = f_c / f_r$ 是变数, 不能保证 PWM 波不是半波镜对称, 有偶次谐波。也不能保证半周期前后 1/4 周期对称, 有余弦项。(3)、当调制信号 f_r 很高时, 载波比: $N = f_c / f_r$ 减小, 2 个不对称性影响变大。偶次谐波和余弦项比重增加。

③



分段同步调制: 输出电压低频时异步调制, 高频时同步调制

10. PWM 逆变电路谐波分析

①单相: $n\omega_c \pm k\omega_r$

$n=1, 3, 5, \dots$ 时, $k=0, 2, 4, \dots$; $n=2, 4, 6, \dots$ 时, $k=1, 3, 5, \dots$

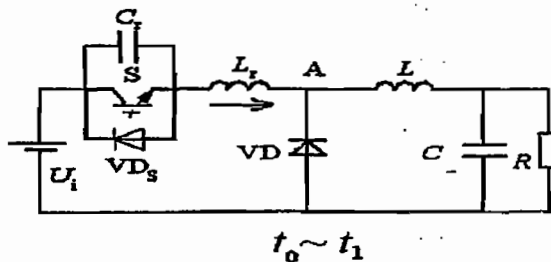
PWM 波中不含低次谐波, 只含 ω_c 及其附近的谐波

以及 $2\omega_c$ 、 $3\omega_c$ 等及其附近的谐波

②三相

和单相比较，共同点是都不含低次谐波。一个较显著的区别是载波角频率 ω_c 整数倍的谐波没有了，谐波中幅值较高的是 $\omega_c \pm 2\omega_r$ 和 $2\omega_c \pm \omega_r$ ，无 3 及其整数倍谐波。

第八章 软开关



1. 零电压开关准谐振电路开关原理要会叙述

2. 条件： $\sqrt{\frac{L_r}{C_r}} I_L \geq U_i$

开关 S 耐压： $u_{cr}(t) = U_p = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} I_L + U_i > 2U_i$

第十章 电力电子技术的应用

1. 变频器，交流调速

晶闸管直流电动机传动系统存在一些固有的缺点 (1) 受使用环境条件制约；(2) 需要定期维护；(3) 最高速度和容量受限制等。

交流调速传动系统除了克服直流调速传动系统的缺点外还具有：(1) 交流电动机结构简单，可靠性高；(2) 节能；(3) 高精度，快速响应等优点。

采用变频调速方式时，无论电机转速高低，转差功率的消耗基本不变，系统效率是各种交流调速方式中最高的，具有显著的节能效果，是交流调速传动应用最多的一种方式。

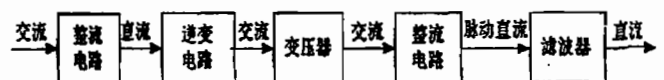
笼型异步电动机的定子频率控制方式，有：(1) 恒压频比 (U/f) 控制 (维持气隙磁通为额定值)；(2) 转差频率控制；(3) 矢量控制；(4) 直接转矩控制等。

恒压频比控制： $\Phi \approx \frac{U}{4.44 f N} = \frac{1}{4.44 N} \cdot \frac{U}{f} \propto \frac{U}{f}$

目的：为了让磁通保持恒定，进而励磁电流保持恒定。否则电流增大了功率因数和效率会降低。

2. 不间断电源 UPS

3. 开关电源



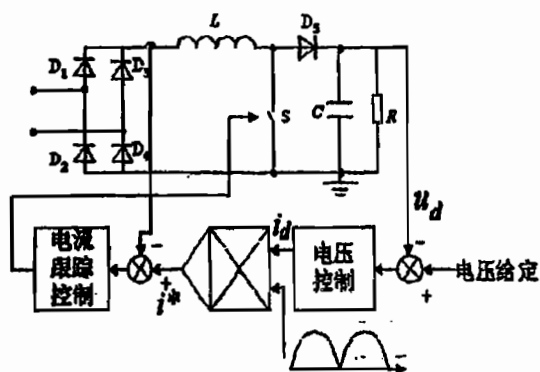
- 输出端与输入端需要隔离；
- 交流环节采用较高的工作频率，可以减小变压器和滤波电感、滤波电容的体积和重量；工作频率高于 20kHz 这一人耳的听觉极限，可避免变压器和电感产生噪音。
- 某些应用中需要相互隔离的多路输出，输出电压与输入电压的比例远小于 1 或远大于 1；

4. 功率因数校正技术 PFC

对电流脉冲的幅度进行抑制，使电流波形尽量接近正弦波的技术，分成无源功率因数校正和有源功率因数校正两种。

(1) 无源功率因数校正技术通过在二极管整流电路中增加电感、电容等无源元件和二极管元件，对电路中的电流脉冲进行抑制，以降低电流谐波含量，提高功率因数

(2)有源功率因数校正技术采用全控开关器件构成的开关电路对输入电流的波形进行控制,使之成为与电源电压同相的正弦波



电路相当于一个二极管整流电路+升压斩波电路。原理要会叙述。

5.高压直流输电：

与高压交流输电相比，高压直流输电具有如下优势：

(1)有利于进行远距离和大容量的电能传输或者海底或地下电缆传输。

1)不受输电线路的感性和容性参数的限制。

2)直流输电线路没有积肤效应问题，相同输电容量下直流输电线路的占地面积也小。

3)短距离送电可采用基于全控型电力电子器件的电压型变流器，性能更优。

(2)更有利于电网联络。

更容易解决同步、稳定性等等复杂问题。

(3)更有利于系统控制。

通过对换流器的有效控制可以实现对传输的有功功率的快速而准确的控制，还能阻尼功率振荡、改善系统的稳定性、限制短路电流。

6. 晶闸管控制投切电容器 TSC——无功功率控制

7.有源电力滤波器 APF

第二章 电力电子器件

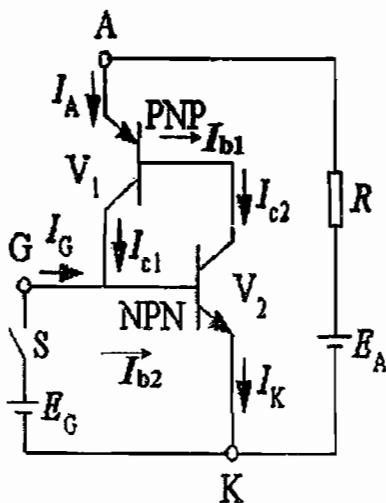
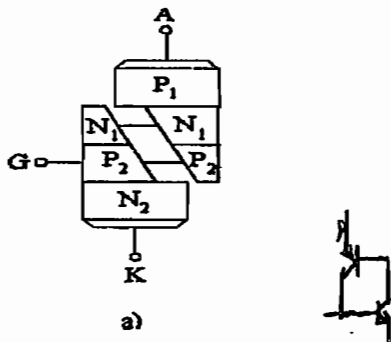
1. 电力二极管

①电导调制效应：维持导通时的低阻状态。（电力二极管在P和N之间多了一层低掺杂的N区，对正向导通不利，这一点是用电导调制效应解决的）

②电容效应：影响工作频率

2. 晶闸管（英文缩写SCR）

①结构：（A-阳极，K-阴极，G-门极）



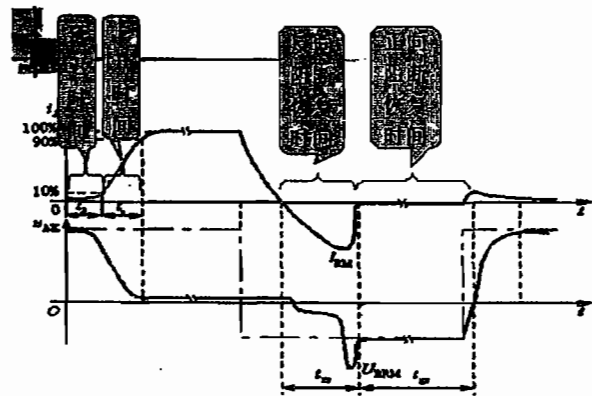
简述工作原理：a-可以看成上面一个PNP加下面一个NPN；b-有 I_g 时，V2通，产生 I_{c2} ，形成V1的基极电流，V1又放大成 I_{c1} 正反馈给V2，形成强烈正反馈，使V1和V2进入饱和导通状态；c-撤掉 I_g 由于正反馈的存在会继续导通，要想关断必须撤掉正压施加反压

②静态特性里要注意的：

a.正向转折电压 U_{bo} ：施加正压但门极未有触发电流 I_g 是不能导通的。但若加的正压太大，超过了这个正向转折电压，可以强制导通

b.维持电流 I_h ：导通期间，如果门极电流为0，阳极电流降到 I_h 以下，则回到正向阻断状态。

③动态特性图



擎住电流：SCR刚从断态转入通态并移除触发信号后，能维持导通所需的最小电流。一般为 I_h 的2-4倍

浪涌电流：电路异常情况引起的并使结温超过额定结温的不重复性最大正向过载电流。有上下两个等级。保护电路的依据

断态电压临界上升率 du/dt ：电压上升率过大会导致晶闸管误导通。

通态电流临界上升率 di/dt ：刚导通时上升过快会有很大电流击中在门极，造成局部过热，进而管子损坏

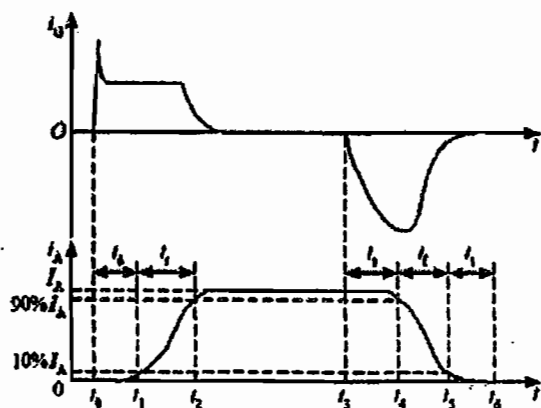
3. 门极可关断晶闸管（英文缩写GTO）

①四层半导体结构，阳极+阴极+门极

②多元的功率集成器件。内部包含多个小GTO单元（为了便于实现门极控制关断）

③开通过程：与SCR相同，延迟时间+上升时间

④关断过程：与SCR不同，存储时间（ I_g 反向增大，阳极电流 I_a 不变。SCR 是阳极电流会反向）+下降时间+尾部时间



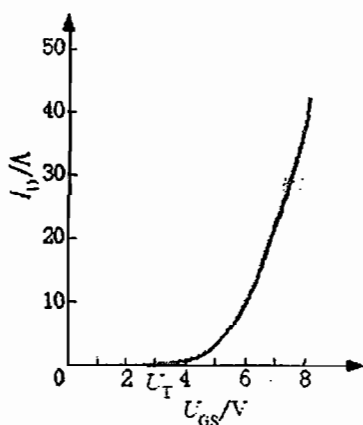
⑤最大可关断阳极电流 I_{a0} ：标称 GTO 额定电流的参数。与其他管子用平均电流来标称不同！！

⑥主要缺点：关断的时候门极电流 I_g 会有反向！！
（描述该性质的一个参数：电流关断增益，最大可关断阳极电流与门极负脉冲电流最大值之比。一个 1000A 的 GTO 关断门极电流负脉冲有 100A）

4. 电力场效应管（电力 MOSFET）

①垂直导电结构（提高耐压和耐电流能力）、多元集成结构（一个器件由许多小 MOSFET 组成）。栅极+源极+漏极

②静态特性：



开启电压：2-3V，工作在饱和区和截止区， U_{gs} 在实际工作中常大于 10V，但超过 20V 可能烧毁

I_d 与 U_{gs} 有关，在 I_d 很大时呈线性

通态电阻：正温度系数

③动态特性

a. 开关时间受其输入电容影响大。（MOSFET 存在输入电容，使开关时间变长，且无法降低。措施是降低栅极驱动电路的内阻 R_s 从而减小充电的时间常数，加快开通时间）

b. 开关时间：10-100ns，频率达 100kHz，是电力电子器件中速度最快的

c. 需要驱动功率。开关时需要输入电容充电。工作频率越高，需要的驱动功率越大。

④参数

a. 电压定额：漏极电压 U_{ds} 。电流定额：漏极电流 I_d + 漏极脉冲电流幅值

b. 栅源电压 U_{gs} 范围：-20V~20V，再大烧毁

c. 极间电容：影响开关特性

5. 绝缘栅双极晶体管（IGBT）

①结构：电力 MOSFET 的漏极侧加一层 P 型半导体。栅极+集电极+发射极（为什么是集电极+发射极？见书 P34 图，其结构相当于一个场效应管+NPN 管）

②静态特性：

a. 与电力 MOSFET 相似， I_c 受 U_{gs} 支配。开启电压 $U_{GE(th)}$ ：2~6V。 U_{GE} ：极限值为正负 20，工作最佳值为 +15V

b. 与电力 MOSFET 不同的：firstly, 有正向阻断区， U_{ge} 太小低于 $U_{ge(th)}$ 不导通。 $U_{ge(th)}$ 是负温度系数，随温度升高略有下降

③动态特性：类似电力 MOSFET

④主要参数：最大 U_{ces} 、最大集电极电流、最大集电极功耗。都很直观，不解释

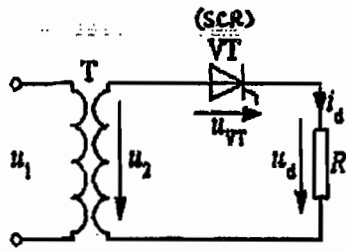
⑤擎住效应：IGBT 内部 NPN 基极与发射极之间存在一个短路电阻，正常工作情况下流过它的电流比较小。如果电流过大，则它产生的大电压会使 PN 结导通，从而让栅极失去对集电极电流的控制作用，导致集电极电流增大，造成器件功率过高而损坏。

⑥正向偏置安全工作区 (FBSOA)：由最大集电极电
流、最大集射极间电压 和最大集电极功耗确定

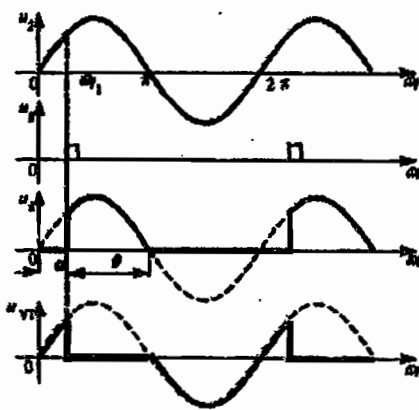
反向偏置安全工作区 (RBSOA)：由最大集电极电
流、最大集射极间电压 和最大允许电压上升率 dU_{ce}/dt 确定

第三章 整流电路 (AC→DC) 电网换流.

1. 单相半波可控整流 (相控方式)



a. 电阻负载



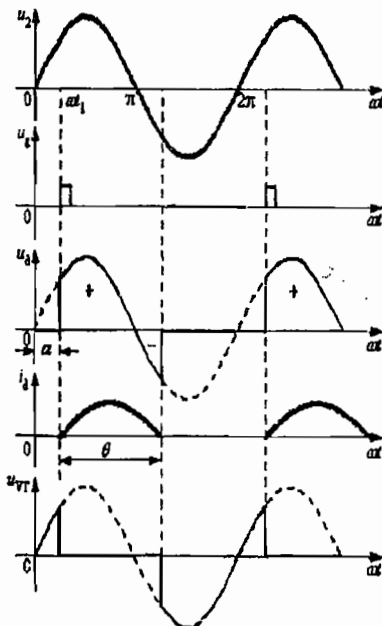
直流电压输出平均:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = 0.45 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

移相角: $0 \sim 180^\circ$

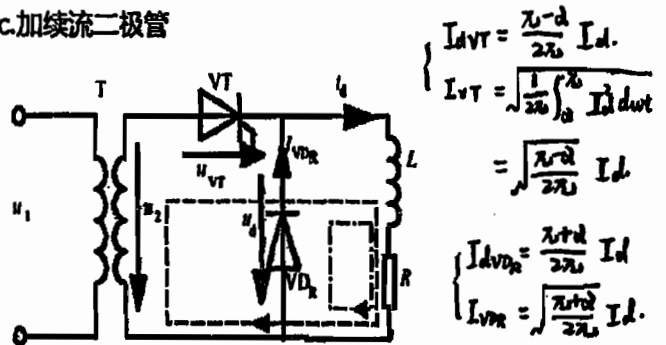
导通角: $180^\circ - \alpha = \theta$

b. 阻感负载 (考虑电感抗作用)

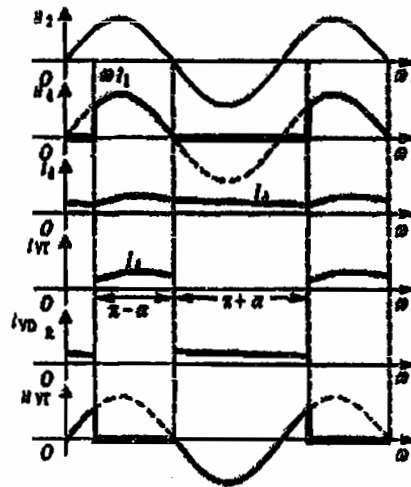


特点: 电压过 0 时电流不为 0, 故二极管可以继续导通, 电压出现负值

c. 加续流二极管



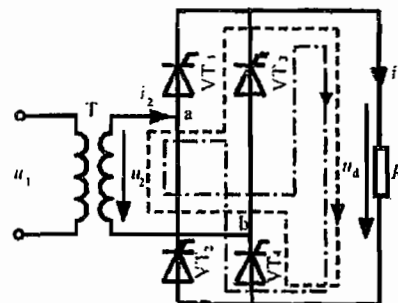
$$\begin{aligned} I_{dVT} &= \frac{\pi - \alpha}{2\pi} I_d \\ I_{VT} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_d^2 d\omega t} \\ &= \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi}} I_d \\ I_{dVD} &= \frac{\pi + \alpha}{2\pi} I_d \\ I_{VD} &= \sqrt{\frac{\pi + \alpha}{2\pi}} I_d \end{aligned}$$



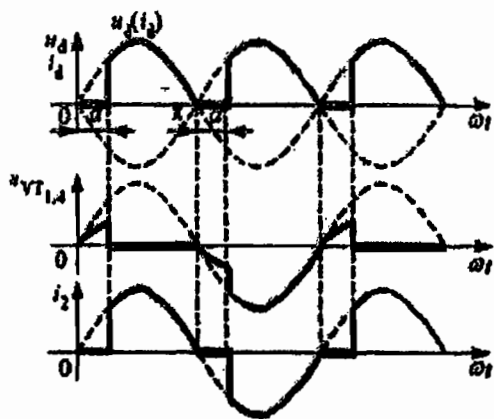
特点: 一方面由于 I_d 的作用, 电压过 0 后复杂通过 VD 续流故可以保持不会为 0; 另一方面, 由于 VD 的作用输出电压不出现负值 (这样可以提高输出电压有效值)

单相半波特点: 简单, 输出脉动大, 变压器中有直流分量, 造成铁心直流磁化。(为了防磁化饱和, 常增大面积, 因设备体积较大).

2. 单相桥式全控



a. 带电阻负载



晶闸管承受最大正压: $\frac{\sqrt{2}}{2}U_2$ (两个管子串联分压)

晶闸管承受最大反压: $\sqrt{2}U_2$ (每个管子单独承压)

输出电压平均值: $0.9U_2 \frac{1+\cos\alpha}{2}$

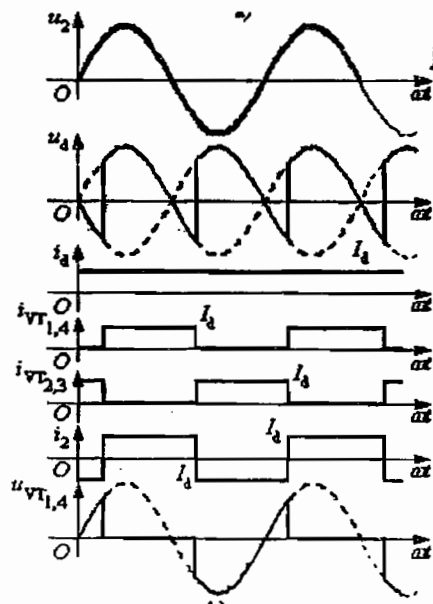
$$I_d = \frac{U_d}{R}$$

$$I_{dVT} = \frac{1}{2}I_d \text{ (只有一半时间在工作)}$$

移相范围: $0 \sim 180$

导通角: $\theta = 180^\circ - \alpha$

b. 带阻感负载



晶闸管承受最大正压: 均为 $\sqrt{2}U_d$ (考虑到电感存在, 在晶闸管截止时输出电压既可以是正也可以是负)

输出电压平均值: $0.9U_2 \cos\alpha$

移相范围: $0 \sim 90$ (90度时波形关于x轴对称输出电压平均值为0)

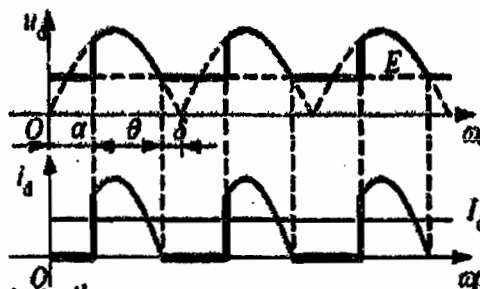
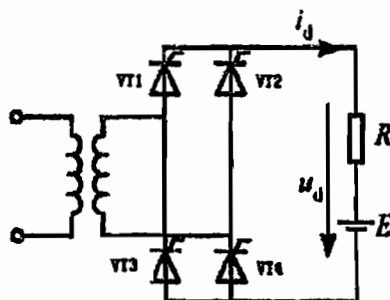
导通角: 始终180

$$I_{dVT} = \frac{1}{2}I_d$$

$$I_{VT} = \frac{1}{\sqrt{2}}I_d = 0.707I_d$$

$$I_2 = I_d$$

c. 带反电动势负载

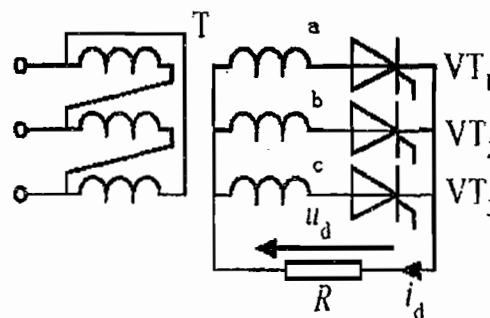


特点: U_d 大于 E 使晶闸管才能导通; 电流为 $I_d = \frac{U_d - E}{R}$ (前面几种情况都是直接 U_d/R)

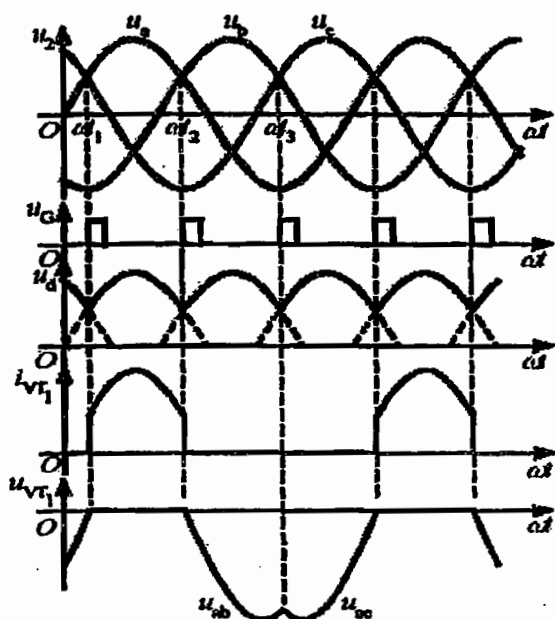
δ 为停止导电角。 $\alpha < \delta$ 时, 虽然触发角很早, 但是触发时 U_d 还小于 E , 不能导通, 所以出发被推迟到 δ , 此时导通角 $\theta = 180 - 2\delta$ 。当 $\alpha > \delta$ 时, 正常出发, 导通角 $\theta = 180 - \alpha - \delta$

$\delta = \arccos \frac{E}{\sqrt{2}U_2}$
为保证电流连续, $L = 2.87 \times 10^{-3} \frac{U_2}{I_{dmin}}$

3. 三相半波可控整流



a. 带电阻负载

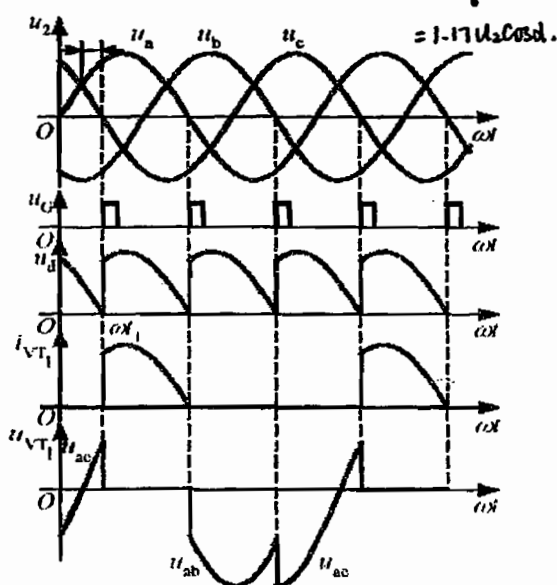


波形分析： U_d 始终是三相中最大的（对应相电压最大的晶闸管导通，并使其他两个关断）；晶闸管上的电压：导通时是 0，关断时是自己与此时正在导通的那一相的线电压

自然换向点：在三相里面，一般选两相电压交点为换向点，延迟角也是从这里开始算起的

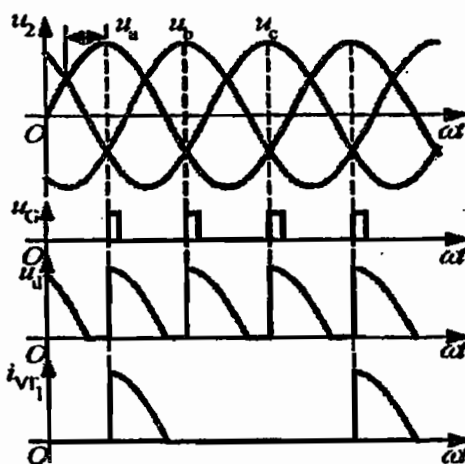
移相角： $0 \sim 150$ （ 150 时一相都通不了）

$0 \sim 30$ 度：电流连续，波形如下：
$$U_d = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = 1.17 U_2 \cos \alpha$$



$30 \sim 150$ 度，电流断续，波形如下：

$$U_d = \frac{1}{\frac{2\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = 0.675 \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right] U_2$$

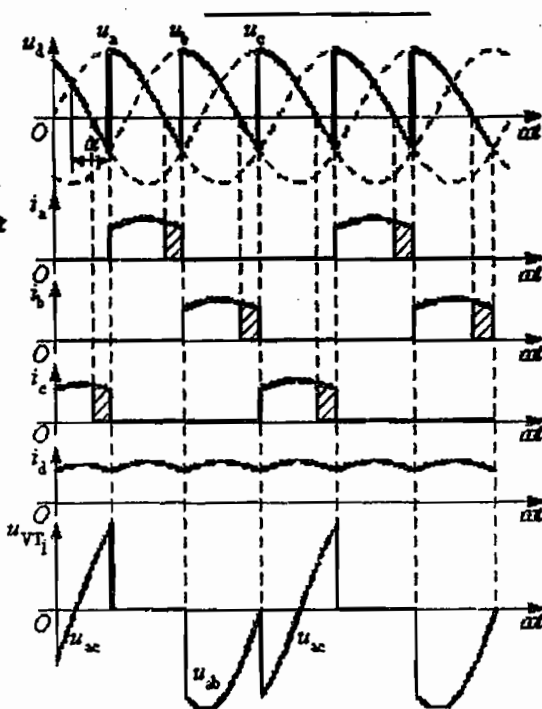


SCR 的承受的电流平均值： $I_d/3$

SCR 承受的最大反向电压：反向电压为线电压，故为 $\sqrt{2} \times \sqrt{3} U_2 = 2.45 U_2$ （线电压）

SCR 承受的最大正向电压：导通的时候输出的就是相电压，故为 $\sqrt{2} U_2$ （相电压）

b. 带阻感负载



特点：电压可以反向了（ $\alpha > 30$ 度时，小于 30 度时 U_d 不用反向，和电阻负载时相同），输出电流 I_d 连续。

移相范围： $0 \sim 90$ （与单相相同， 90 度时正负电压抵消输出电压平均值为 0）

$$U_d = 1.17 U_2 \cos \alpha$$

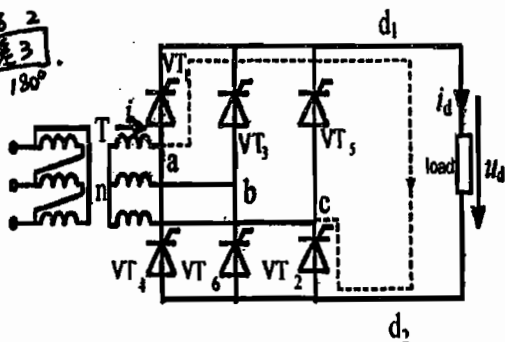
电力电子技术 复习重点 Made by 3903 王子剑

$$I_2 = I_{VT} = \frac{1}{3} I_d = 0.577 I_d$$

晶闸管最大正反向电压为线电压 $2.45 U_2$

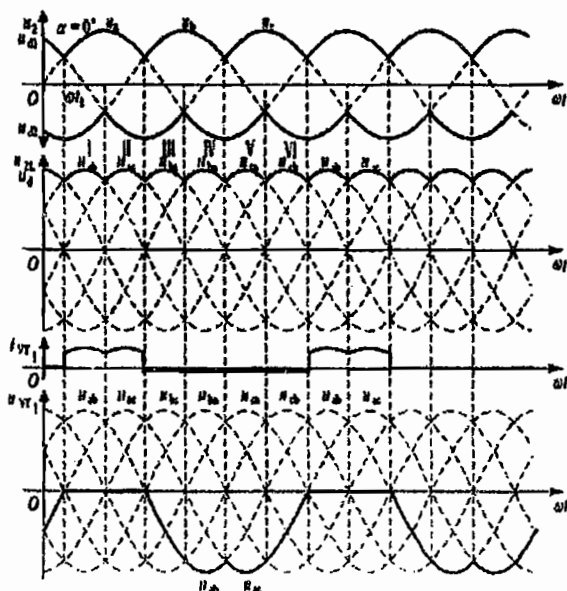
4. 三相桥式全控整流

上 1 3 5
下 4 6 2
上 下 对应 3
180°



特点：相比单相，同时导通的晶闸管有两个（对共阳晶闸管，阴极电压最小者导通；对共阴，阴极电压最大者导通）。此时输出电压为线电压，幅值相比单相的要大

a. 电阻负载



波形分析：负载两端的相电压与单相相似，谁大输出谁。负载上的线电压：哪两相相电压正在导通则输出他俩的线电压

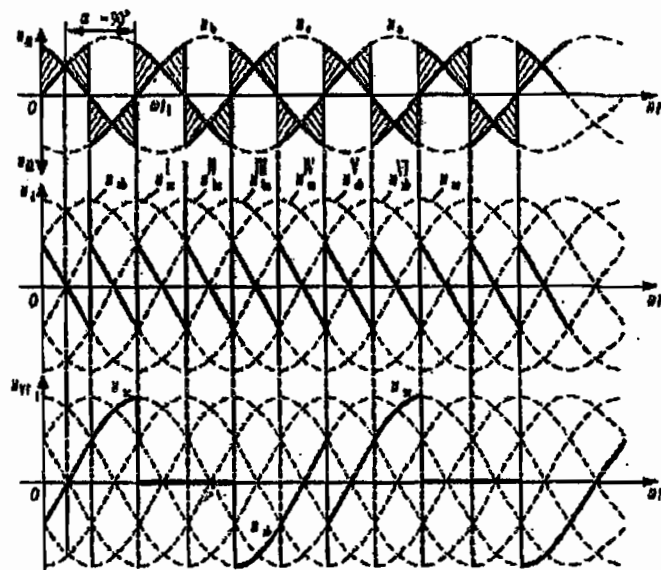
管子导通顺序：按 VT1~6 的顺序依次导通

移相范围：0~120 度（120 度的时候，给管子导通信号时它的相电压已经不是最大，不能输出）

0~60 度：输出电压电流连续

60~120 度：输出电压电流不连续

b. 阻感负载



① 导通角 < 60 度时，相电压不用输出负的，与电阻负载相同

② 导通角 > 60 度时，Ud 波形会输出负值

移相范围：0~90 度（90 度时正负电压抵消平均值为 0，与单相桥式、三相半波带阻感负载情况相同）

阻感（电阻）负载：

$$\alpha \leq 60^\circ \text{ 时: } U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \sqrt{6} U_2 \sin \omega t d\omega t$$

$$= 2.34 U_2 \cos \alpha$$

电阻负载：

$$\alpha > 60^\circ \text{ 时: } U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\pi} \sqrt{6} U_2 \sin \omega t d\omega t$$

$$= 2.34 U_2 \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{3} + \alpha \right) \right]$$

电感：I₂ = 0.816 I_d

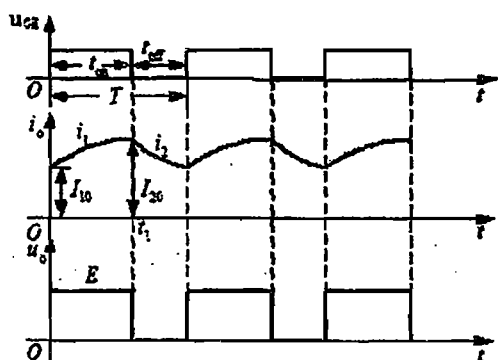
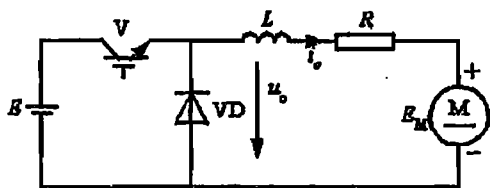
第五章 直流斩波电路 (DC-DC) (器件接法)

1. 斩波电路的三种控制方式：脉宽调制 (调节开关导通时间 T_{on})、调频 (保持 T_{on} 不变, 调节开关周期 T)、混合型

2. 占空比: $\alpha = t_{on} / T$

开关元件: 自关断元件 (IGBT)。不可像整流电路一样进行电网换流。

3. 降压斩波电路 (Buck电路)



① 负载电压平均值: $U_o = \frac{t_{on}}{T} E$

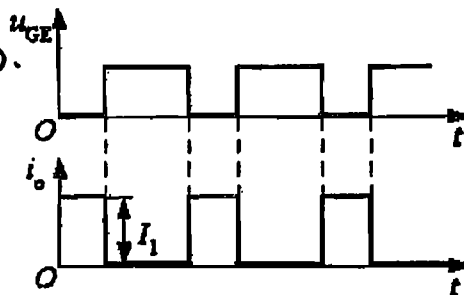
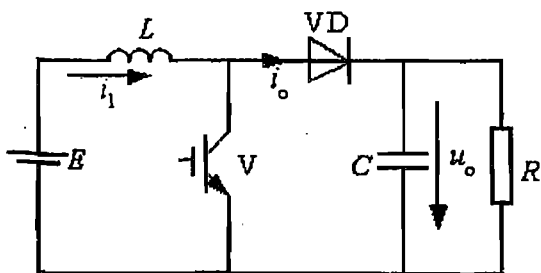
负载电流平均值: $I_o = \frac{U_o - E_m}{R}$

② 电流有可能断续, 电流断续的条件是: $\alpha > 1.5 - 1.5^2$

$$m > \frac{e^{\alpha\rho} - 1}{e^{\rho} - 1}$$

其中, $m = E_m / E$, $\rho = T / \tau$, $\tau = L / R$, $\alpha = t_{on} / T$

4. 升压斩波电路 (Boost电路) P_{25}



理解: V 导通, 电源停止给负载供电, 而是给电感充电, 电容将电压 hold 住。V 关断, 电源+电感一起给负载供电同时给电容充电, 这时刚在电感里面充的点会瞬时爆放出来, 导致升压。所以升压时应该让 V 导通的时间大于关断的时间。

① 升压的两个关键原因: a. 电感储能之后有使电压泵升的作用 b. 电容 C 可将输出电压 Hold 住

② 输出电压

$$U_o = \frac{T}{t_{off}} E$$

③ 电流断续的条件:

$$m < \frac{1 - e^{-\beta\rho}}{1 - e^{-\rho}}$$

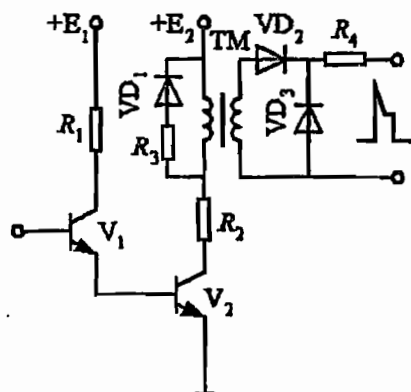
④ 应用: 直流电机传动, 单相功率因数校正, 其他交直流电源

第九章 电力电子器件应用的共性问题

1.内容

- 影响开关特性、损耗，装置的运行效率、可靠性和安全性
- 实现器件或整个装置的一些保护措施
- 不同的器件对驱动有不同的要求
- 采用电气隔离环节
- 驱动电路：分立元件，专用集成驱动电路

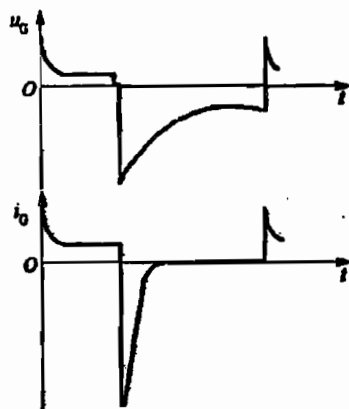
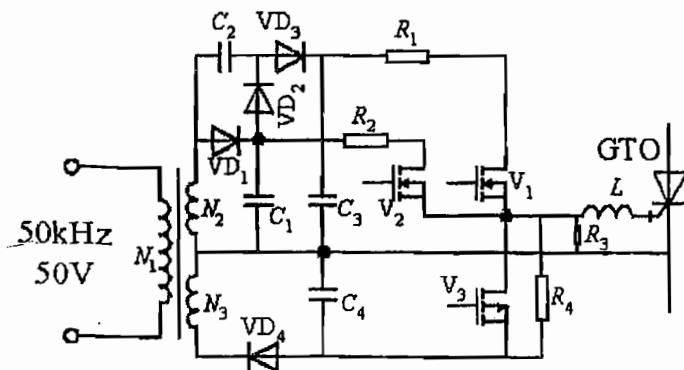
2.晶闸管触发电路（粗略掌握）



组成：V1V2 构成的放大环节+脉冲变压器 TM+附属电路构成的脉冲输出环节

注意：VD1 和 R3 是为了让 V1V2 截止后变压器释放储能而设置的

3.GTO 驱动电路（重点掌握）



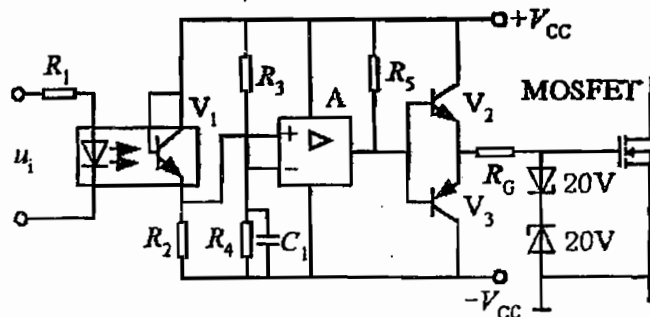
①需要解决的问题：a.触发前沿的陡度要求高 b.需要在整个导通期间施加正极门电流 c.使GTO关断需要施加负极门电流 d.关断后还应在门、阴极间施加5V的负偏压以提高抗干扰能力...

②组成：开通驱动电路+关断驱动电路+门极反偏电路

③机理：电源经二极管整流后提供。VD1 和 C1 提供 +5V 电压，VD2、VD3、C2、C3 构成倍压整流电路提供 +15V 电压，VD4 和 C4 提供 -15V 电压。

V1 开通时输出正强脉冲; V2 开通时输出正脉冲平顶部分; V2 关断 V3 开通输出负脉冲; V3 关断后 R2 和 R4 提供门极负偏压。

4.电压驱动型器件的驱动电路



①要解决的问题：a.为减小开通时间应具有较小的输出电阻 b.电力 MOSFET 开通栅源电压 $10 \sim 15V$ IGBT 开通栅射电压一般 $15 \sim 20V$ c.关断时需要一定的负电压

②机理：无输入信号时放大器 A 输出负电平，V3 导通输出负驱动电压；有输入信号时，A 输出正电平，V2 导通输出正驱动电压。

5. 过压保护

6. 过流保护 (这两个应该不会重点考吧)

7. 缓冲电路

① 关断缓冲电路： du/dt 抑制电路：吸收关断过电压和换相过电压，抑制 du/dt ，减小开关损耗

② 开通缓冲电路： di/dt 抑制电路：一直器件开通时的电流过冲和 di/dt ，减小器件的开通损耗

