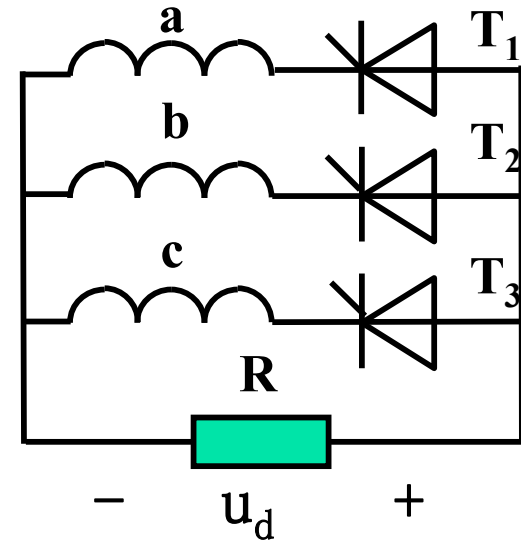
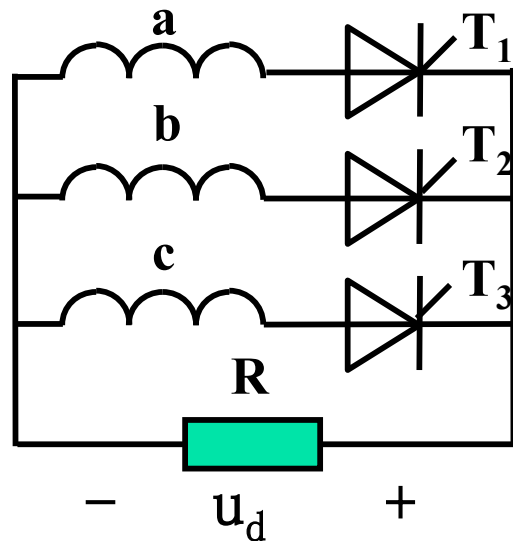


§ 2-5 三相半波可控整流电路

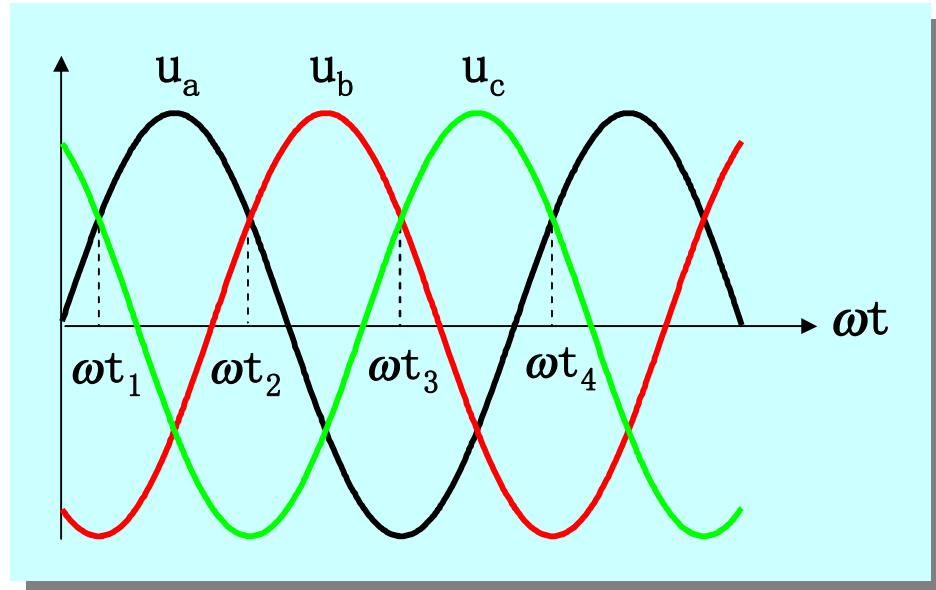
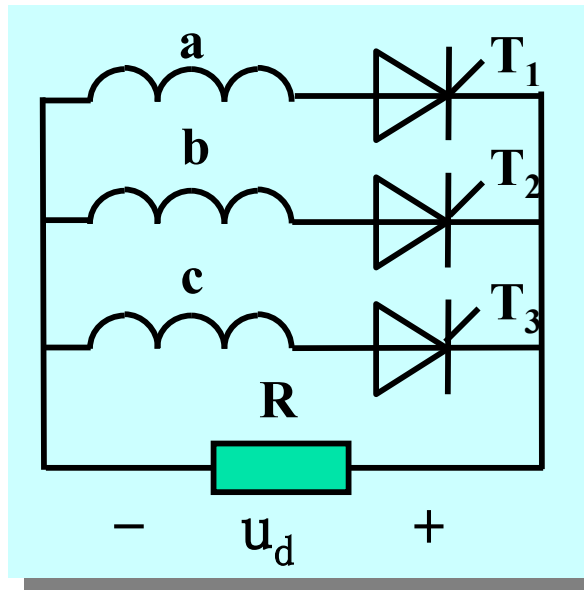
一、电路结构

三相半波可控整流电路有两种接线型式：共阴极三相半波与共阳极三相半波电路



共阴极三相半波容易理解，应用最多，讲课以它为主。共阳极三相半波电路主要用来构成三相桥。

三相电源的基础知识—由此得到重要结论



根据电路结构可知，电路的中线与电势图中 ωt 轴对应；三相相电势是指变压器输出端子与其中线间的电压值；各相电势的最大值出现规则为：

$\omega t_1 - \omega t_2$: a相电势出现最大值

$\omega t_2 - \omega t_3$: a相电势出现最大值

$\omega t_3 - \omega t_4$: a相电势出现最大值

三个最大值不同时出现，各占1/3周期

共阴极联接电路中，当相电势为正（正半周）时晶闸管才可能导通。**共阴极三相半波开关在正半周导通**
共阳极三相半波开关在负半周导通

当在 $\omega t_1 - \omega t_2$ 即a相电势出现最大值其间，若 T_1 导通则 T_2 两端的电压 $u_{T2} = u_b - u_a < 0$ ，即 T_2 承受反压。这表明若 T_2 以前是导通的，则 T_2 会立刻关断；若 T_2 是关断的则在这个区域 T_2 不可能导通

同理，当 T_1 导通后，则 T_3 两端的电压 $u_{T3} = u_c - u_a < 0$ ，即 T_3 承受反压。由于三相电势的最大值依次出现，所以在任何时刻只有一个开关可以导通。即只有一个半波电路在工作

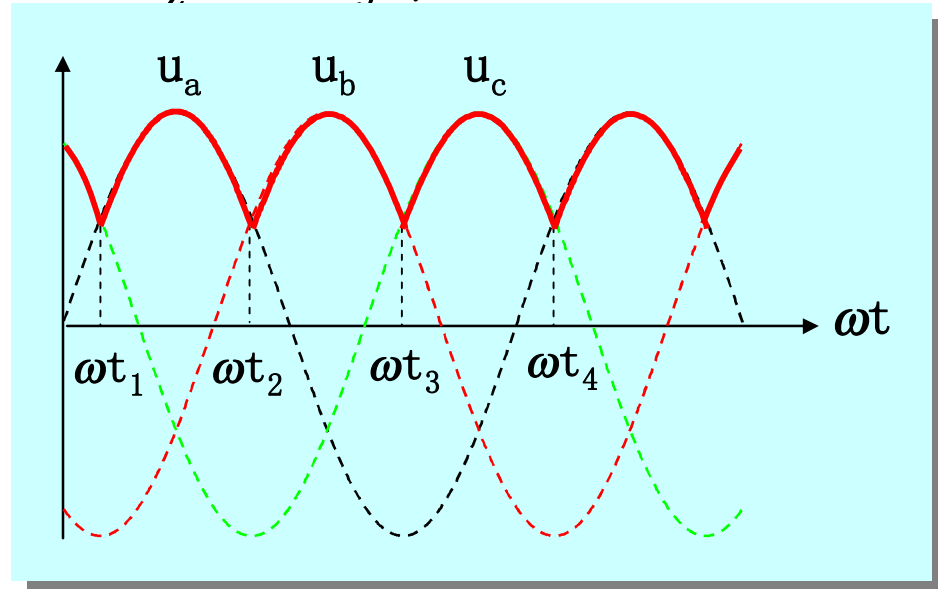
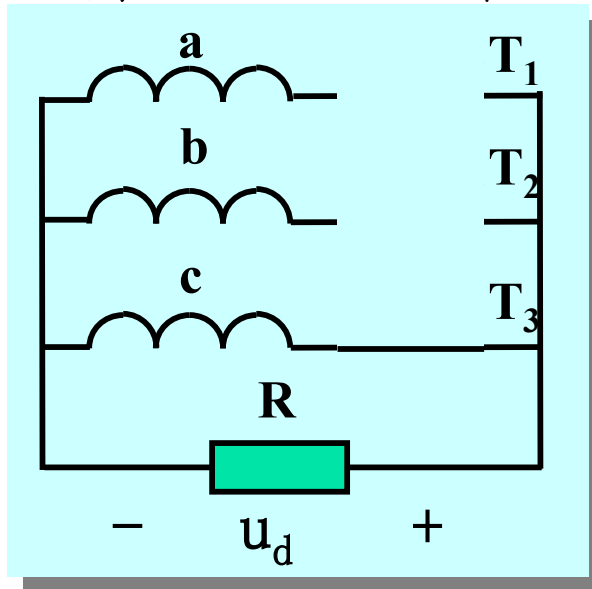
电路工作的特点：任何时刻只有一相工作；哪相电压最高哪相工作。

同理 共阳半波电路 是哪相电压最低哪相工作

结论: 三相半波=(三个分别工作的)三个单相半波

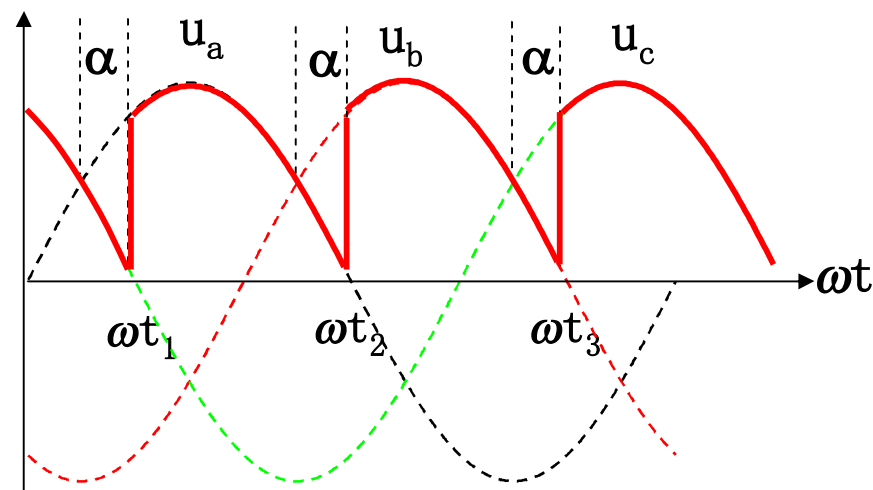
1. 电阻负载

三相电势最大值的交换点称为自然换相点或控制角起算点。即图中 ωt_1 、 ωt_2 、 ωt_3 等点。



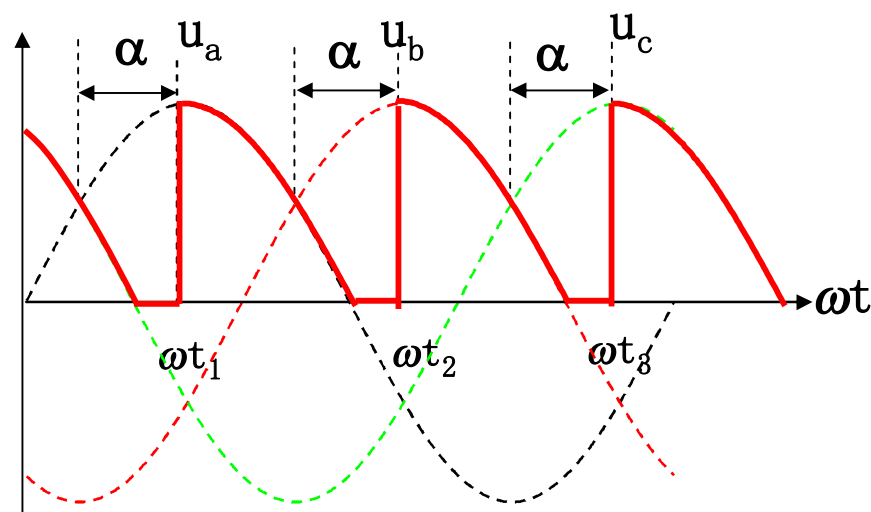
设控制角 $\alpha=0$ ，则在 ωt_1 点 T_1 导通 $u_d=u_a$ ， T_2T_3 均不可能导通。同理到 ωt_2 点 T_2 导通 T_1 关断 $u_d=u_b$ ， T_3 不可能导通。到 ωt_3 点 T_3 导通 T_2 关断 $u_d=u_c$ ， T_1 不可能导通。

当 $0 < \alpha < 30^\circ$ 时, u_d 连续电路工作过程: 在 ωt_1 点 T_1 导通 T_3 关断 $u_d = u_a$; 到 ωt_2 点 T_2 导通 T_1 关断, $u_d = u_b$; 在 ωt_3 点 T_3 导通 T_2 关断, $u_d = u_c$



特点: u_d 连续, 各个晶闸管均导通 120° 或 $1/3$ 周期

$\alpha > 30^\circ$ 在 ωt_1 点 T_1 导通。
 $u_d = u_a$ 。到 a 相的 π 点, 因为 $i_{T1} = 0$, T_1 关断。同理 T_2 T_3 分别从 ωt_2 点 ωt_3 点导通到各自的 π 点后关断。此时 u_d 不连续, 晶闸管导通角小于 120°

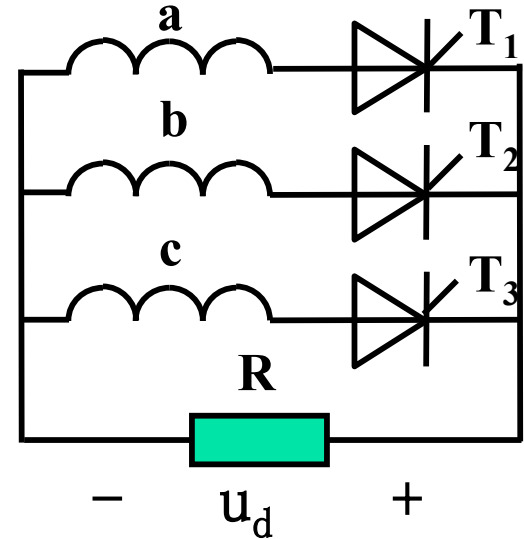


开关两端的电压波形分析以 T_1 为例

如果 $T_1T_2T_3$ 均不导通，就没有电压与电流输出。共阴极电位与中线电位相等，器件两端电压就是相电压
当 T_1 自己导通时， u_{AK1} 为零

T_2 导通时， $u_{AK1}=u_{ab}$ ，为线电压

T_3 导通时， $u_{AK1}=u_{ac}$ ，为线电压



特点:开关两端的最大电压为线电压的峰值

主要电量的计算

输出直流电压：分连续与不连续两种情况

$$\alpha < 30^\circ \text{ 时 } U_d = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 1.17U_2 \cos \alpha$$

$\alpha > 30^\circ$ 时

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

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

其它量，如晶闸管电流有效值、负载电流有效值等应根据波形和定义计算

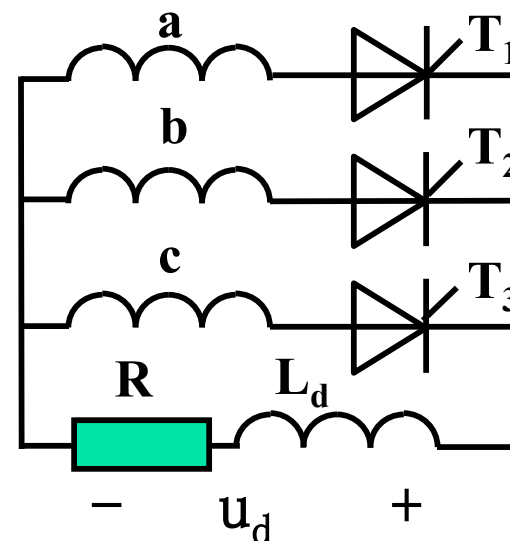
讨论：三相半波电路中，当 u_d 连续时晶闸管承受的电压是线电压。晶闸管被反压关断实现换相。而当 u_d 不连续时它因电流到零而关断

当 u_d 连续时每个晶闸管导通 120° ， u_d 不连续时晶闸管导通角小于 120°

移相范围为 150°

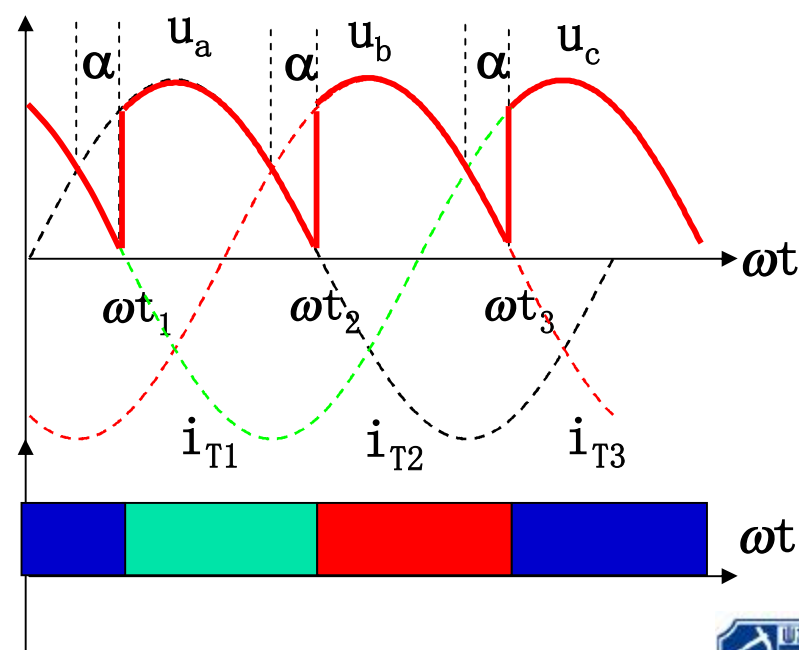
2. 电感电阻负载

设电感 L_d 足够大，直流侧电流连续平直。此时，电路输出电压 u_d 连续同样，电路是分别工作的三个单相半波电路。



当 $\alpha < 30^\circ$ ，电压波形连续；
电流为一条直线。每个晶闸管工作 $1/3$ 周期

当 $\alpha > 30^\circ$ ，由于电感的作用
电压波形中有部分负电压波形。每个晶闸管工作 $1/3$ 周期



当 α 增大时电压波形负的部分增多正的部分减少。当 $\alpha=90^\circ$ 。正负波形相等， $U_d=0$ 。移相范围是 90°

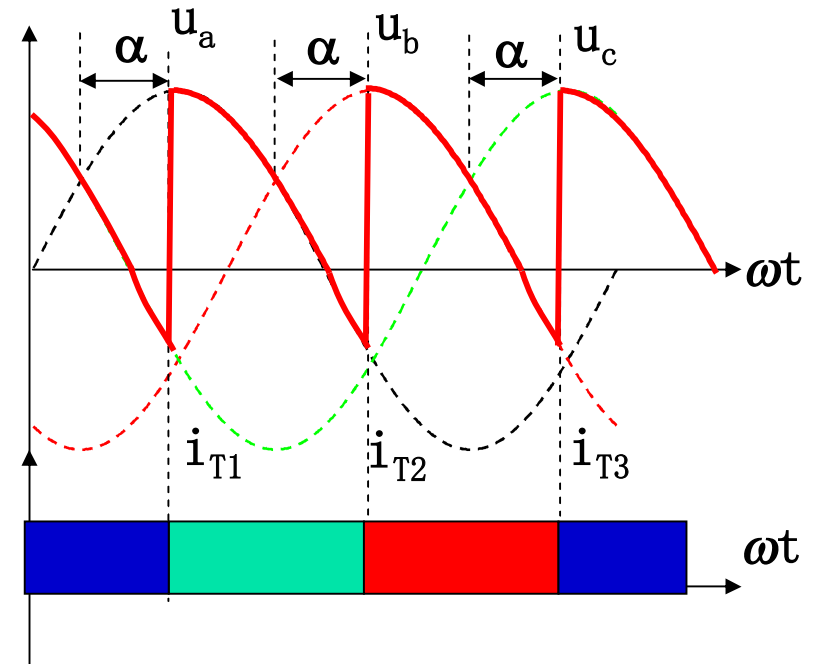
主要电量的计算

$$U_d = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t)$$

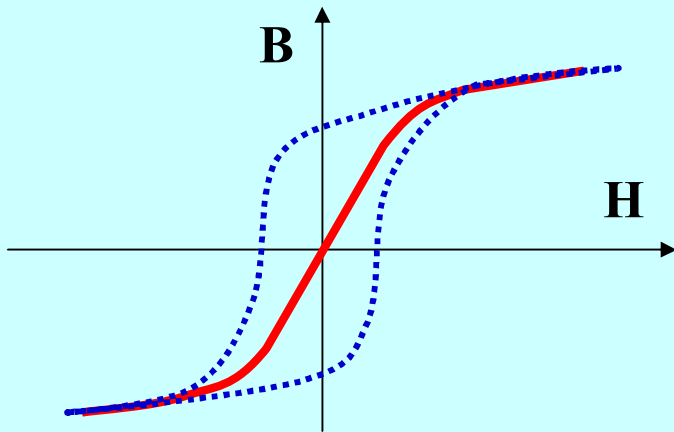
$$= 1.17U_2 \cos \alpha$$

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

晶闸管电流有效值 $I_T = \frac{1}{\sqrt{3}} I_d$



该半波电路的变压器有直流磁化问题



由于变压器副边流过直流分量，它在变压器中产生直流磁势，使变压器工作点发生变化，结果可能使变压器工作点移动到饱和区。这会使变压器的激磁电抗急剧变小，磁化电流增大从而烧损变压器。

同时由于直流分量不能经过变压器，所以原副边的电流有效值不满足变比关系。容量设计时需要考虑这些因素。

副边容量 $S_2 = 3U_2 I_2$

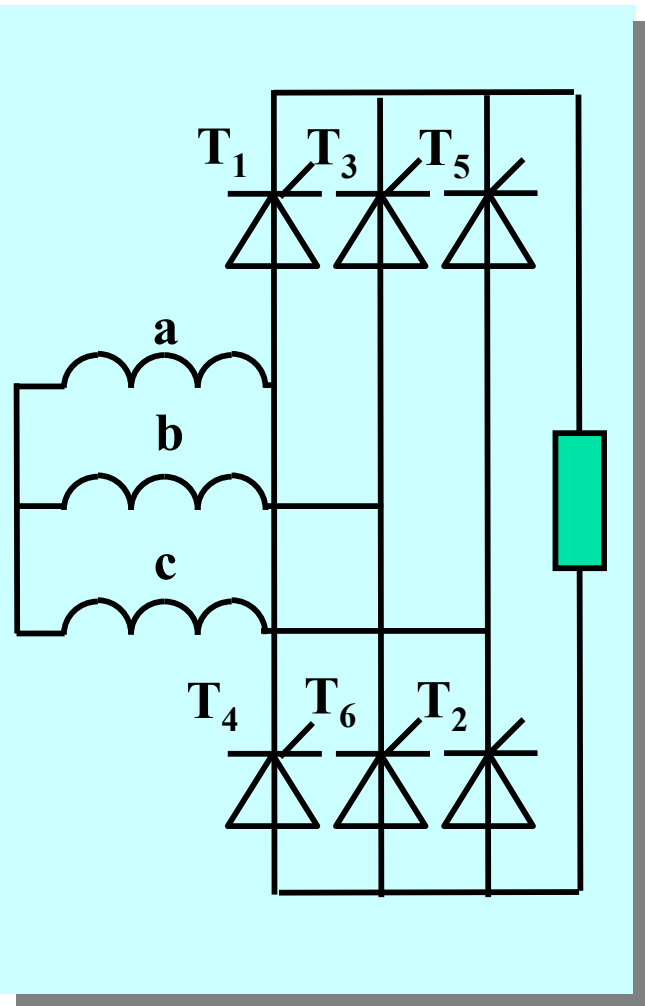
原边容量 $S_1 = 3U_1 I_1$

设计容量 $S = (S_1 + S_2) / 2$

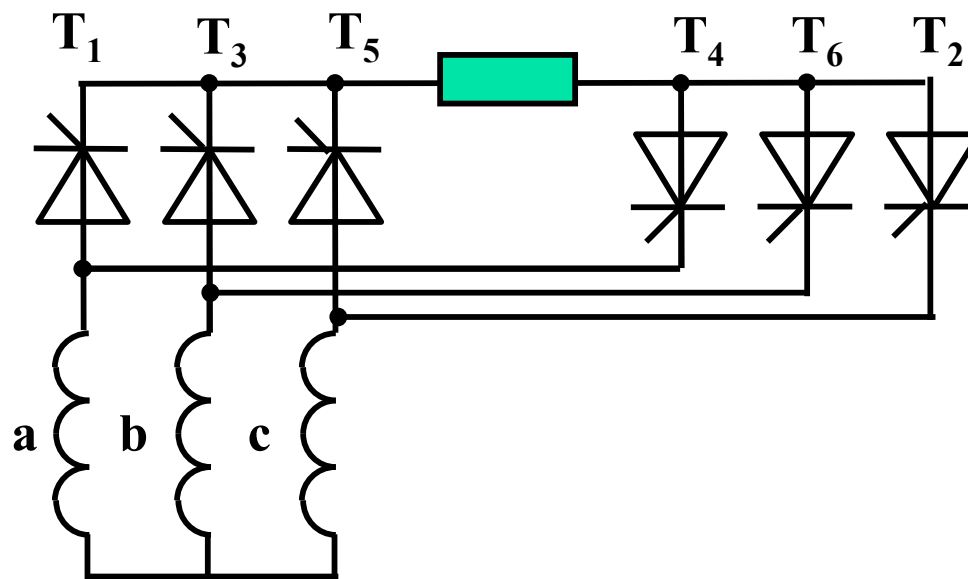
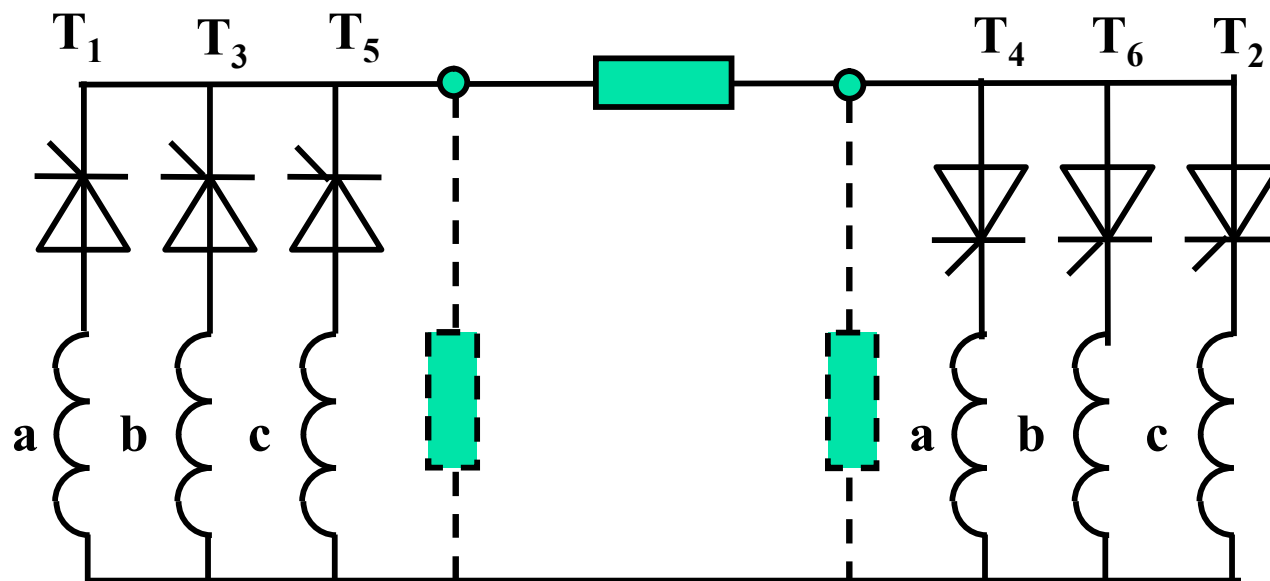
I_1 是原边电流的有效值。它是折算到原边的副边电流的交流分量。可根据波形图计算出来。

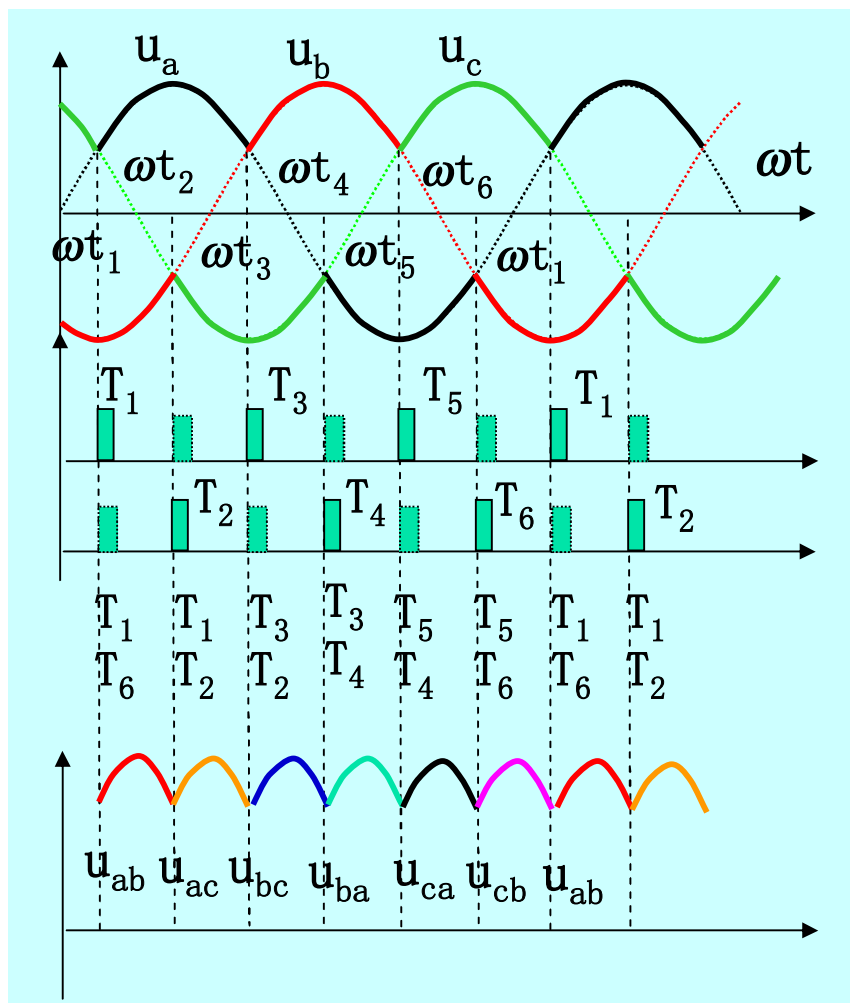
§ 2-6 三相桥式可控整流电路

1. 电路的结构: 三相桥是一个共阴极三相半波与一个共阳极三相半波电路的串联



共阳极半波电路的特点: 要使晶闸管导通, 必须使其承受正向电压。共阳极晶闸管在负半周导通。任何时刻只有一相工作; 哪相电压最低哪相工作。自然换相点或控制角起算点在相电势负半周的交点上。输出电压的极性与参考方向相反, 即为负。换流时总是换到电压最低的一相上去。





设 $\alpha=0$ 。共阴极与共阳极半波电路各自的控制脉冲如图所示。由此可得

1. 任何时候总是一个共阴极开关与一个共阳极开关同时导通构成回路
2. 工作顺序是 $T_6T_1-T_1T_2-T_2T_3-T_3T_4-T_4T_5-T_5T_6-T_6T_1$
3. 同一联接组的开关交换这称为横向换流方式。
4. 每隔 120° 同一联接组间换流一次；每隔 60° 电路换流一次

5. 输出电压 U_d 是共阴极半波电路输出电压 U_{d1} 与共阳极半波电路输出电压 U_{d2} 之差：即 $U_d = U_{d1} - U_{d2}$ 。从波形图上看就是共阴包络线与共阳包络线之间的距离。

6. 为保证回路工作不间断，应采用宽脉冲或双脉冲触发。

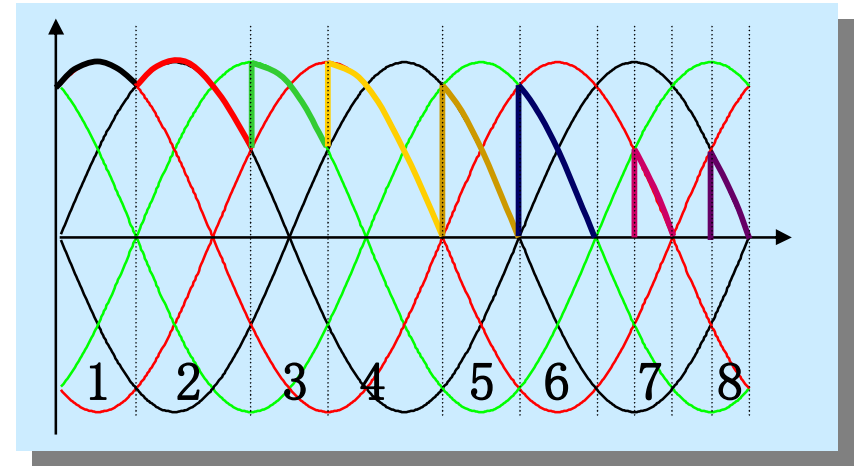
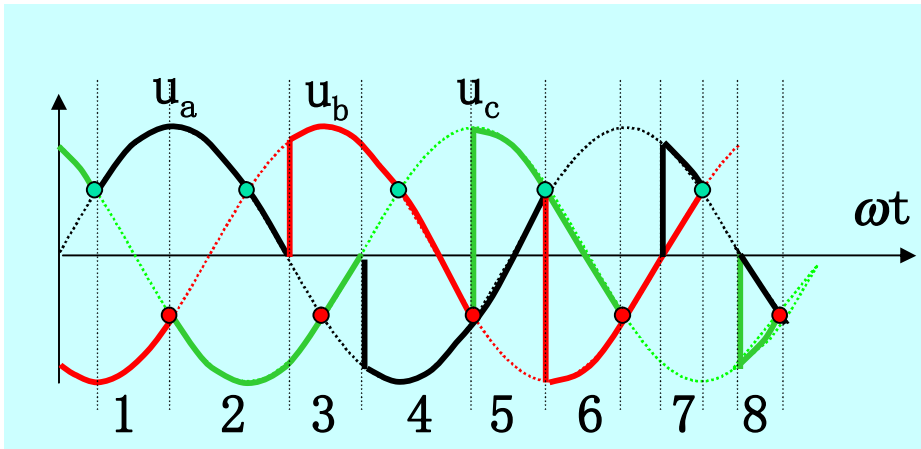
利用三相半波知识来分析桥式电路的一般步骤：

1. 确定控制角，分别作出各个半波电路输出的包络线。

2. 作出输出电压 $U_d = U_{d1} - U_{d2}$ 。

要说明的是，在桥式电路中驱动回路电流流动的是线电势。回路能否导通取决于作用在该回路中的线电势而不是相电势。

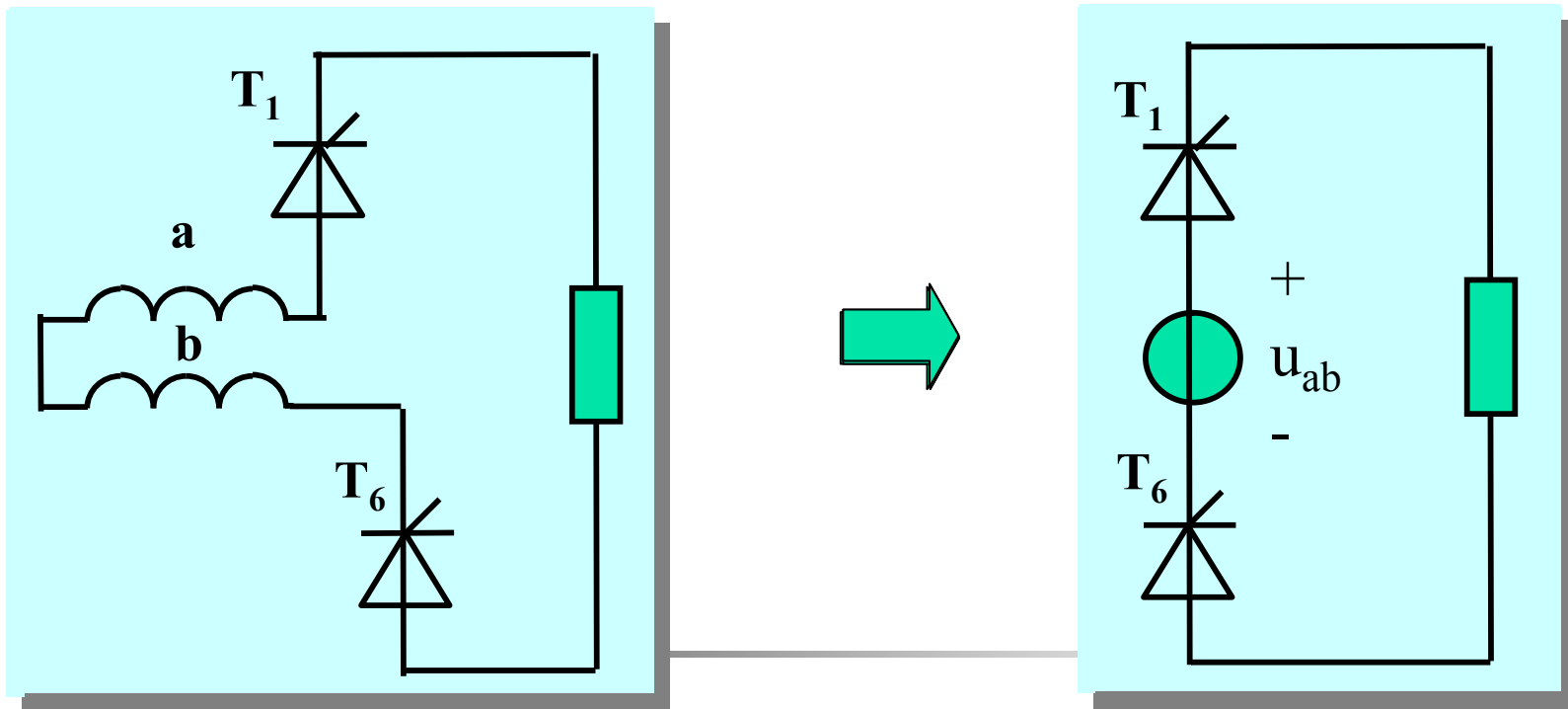
例如，当负载为电阻，控制角变化时输出电压的波形的确定：



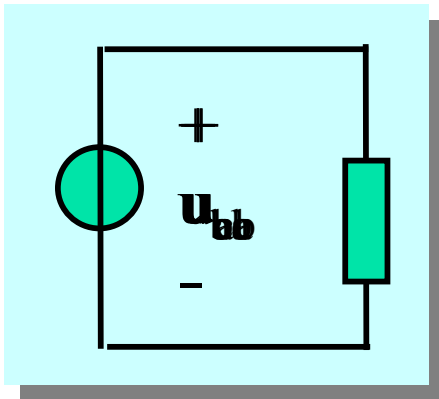
将半波输出包络线分段，在线电压图上绘出来，即得到输出电压 u_d 的波形图。据此图可以得到其它波形，它是计算的基础。采用半波方式不能直接得到输出电压波形。

采用半波叠加法的优点：不需要增加任何新的知识就能理解桥式电路的工作情况。物理概念清楚。缺点是不直观，要进行波形叠加。有与半波不同的规则，需要牢记。当了解了工作顺序后再来考查三相桥电路：

由于工作顺序是 $T_6T_1-T_1T_2-T_2T_3-T_3T_4-T_4T_5-T_5T_6-T_6T_1$ 一个共阴极开关与一个共阳极开关构成导通回路。



从状态等效上看，三相桥实际上就是6个等值电路轮流作用。它们分别作用一次，电路就工作一个周期。从负载R上看，各个等值电路的结构不变，只是作用的线电势在变化，是6个线电势在轮流作用。

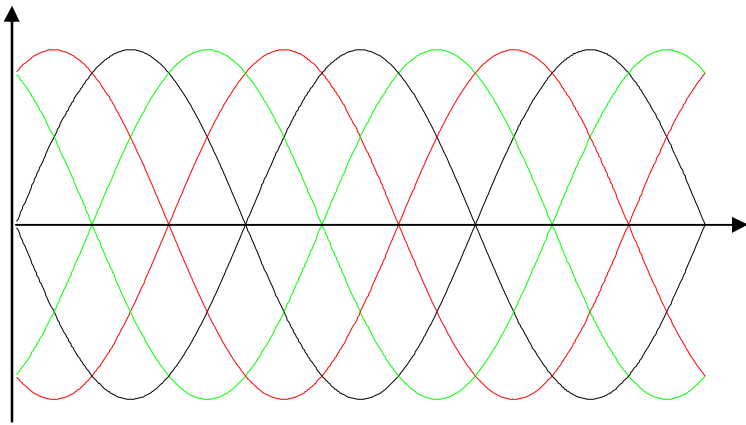


问题：1. 如何确定6个线电势的相位(相互关系)，怎样绘出这6个电势。

2. 某个电势何时开始作用(于负载)，何时结束。与控制角的对应关系如何。

参考相电势图或考查全部的等值电路，可知作用在负载上的电势是 $T_6T_1(u_{ab}) - T_1T_2(u_{ac}) - T_2T_3(u_{bc}) - T_3T_4(u_{ba}) - T_4T_5(u_{ca}) - T_5T_6(u_{cb}) - T_6T_1(u_{ab})$ 。这6个线电势按顺序出现，有规律。

根据三相理论，很容易由相电压作出这6个线电压。



方法：先作出线电压 u_{ab} 、 u_{bc} 、 u_{ca} ，再将它们倒相即得到 u_{ba} 、 u_{cb} 、 u_{ca} 。它们与开关状态正好对应。

为确定各线电压的切换时刻，需要研究半波电路的 α 起算点在线电势图上的投影。可以证明， α 起算点映射在线电势最外的交点上。即各等效电路的切换点在线电势最外的交点起，延迟 α 后的那一点上。

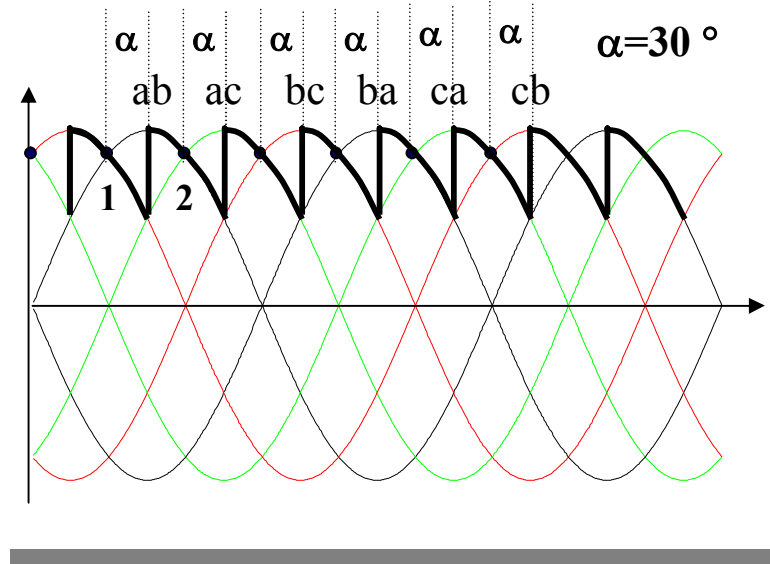
由于其对应关系简单，采用这种方法很方便易懂。

小结：由晶闸管的工作顺序可得到6个等效电路。作用在负载上的电压总是这6个线电势。桥式电路就是这6个线电势的轮流作用。当确定了它们的相位和作用时刻后，可用等效电路的方法来研究三相桥。



1. 电阻负载

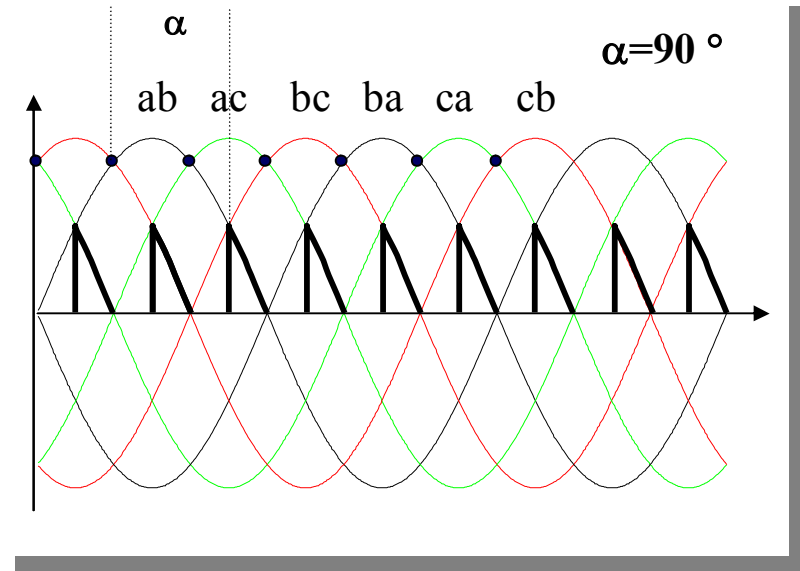
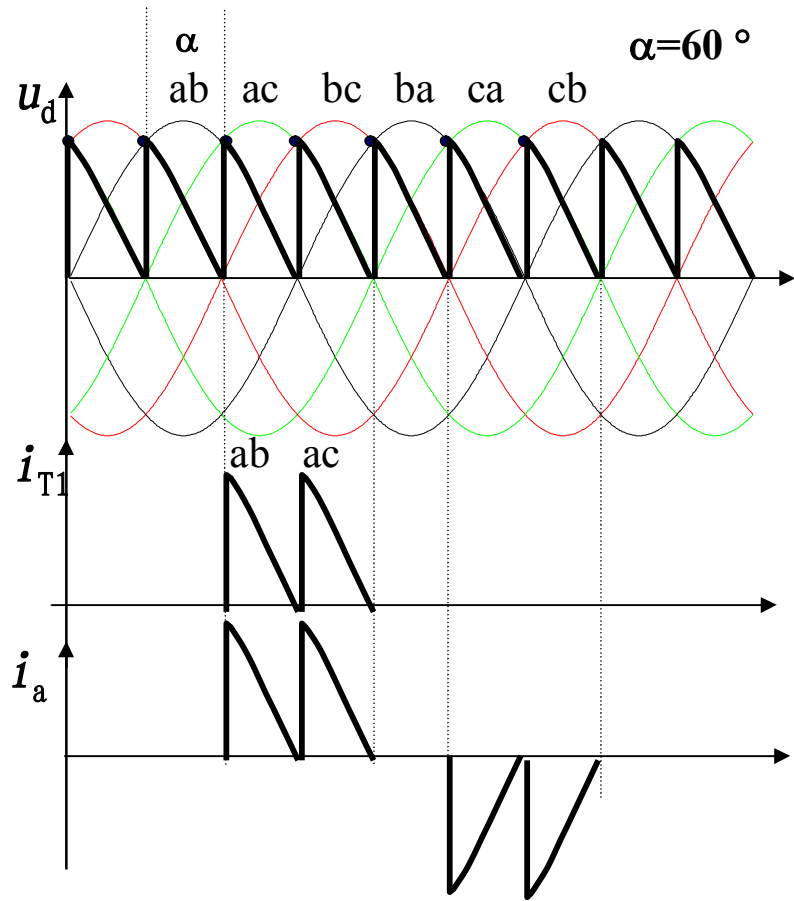
过点1后，应当让线电压 u_{ab} 作用。由于控制角是 α ，所以延迟 α 后将 u_{ab} 投入，负载上的电压就是 u_{ab} 。



过点2后，应当让线电压 u_{ac} 作用。所以延迟 α 后将 u_{ac} 投入，将 u_{ab} 切除，负载上的电压就由 u_{ab} 变成了 u_{ac} 。

同理得到其它电势作用时负载上的电压波形。

从波形图上看到，当控制角 $\alpha < 60^\circ$ 时 u_d 波形连续；当 $\alpha > 60^\circ$ 时由于回路中的线电势到其 π 点时为零，电流为零，晶闸管关断， u_d 波形就不连续了。

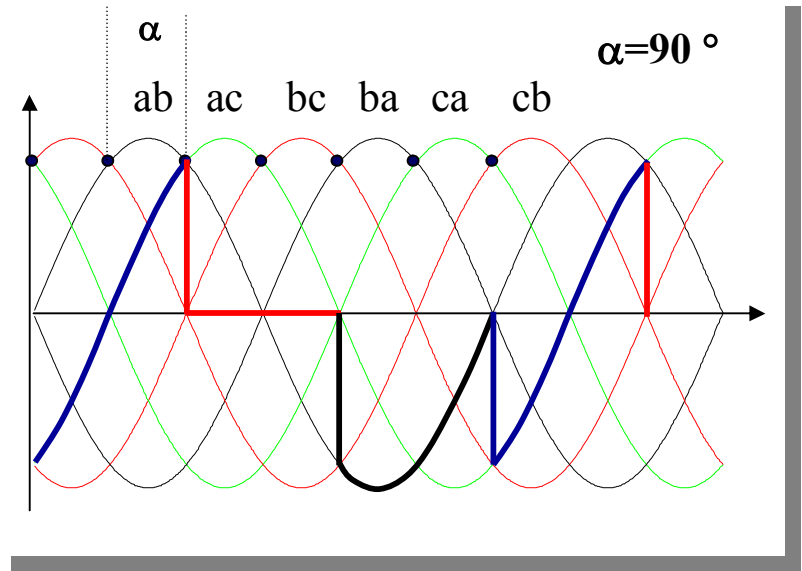


$\alpha=60^\circ$ 和 $\alpha=90^\circ$ 时的 u_d 波形如图。当 u_d 波形作出后其它相关的波形就很容易作出

晶闸管的电流，以 T_1 为例。当 u_{ab} 、 u_{ac} 作用时，电流都通过 T_1 。所以与之对应的电流波形就是流过 T_1 的电流变压器副边的电流：为 T_1 与 T_4 电流的叠加。 i_{T1} 为正 i_{T4} 为负。

晶闸管两端的电压波形

以 T_1 为例，令 $\alpha=60^\circ$ 。先找出 T_1 导通时刻。导通后它两端电压为零。当 T_3 导通 T_1 关断后它两端电压为 u_{ab} 当 T_5 导通 T_3 关断后它两端电压为 u_{ac} 。



当 u_d 连续时 ($\alpha < 60^\circ$)， u_{AK1} 的波形如图。它由三段波形构成。每段占据 120° 。当 u_d 不连续时的波形图较复杂

主要电量的计算：根据波形图可知得 u_d 分为连续与不连续两种情况。

$$U_d = \frac{1}{\pi/3} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \sqrt{6}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 2.34U_2 \cos \alpha$$

$(\alpha \leq 60^\circ)$

当 $\alpha > 60^\circ$ 时:

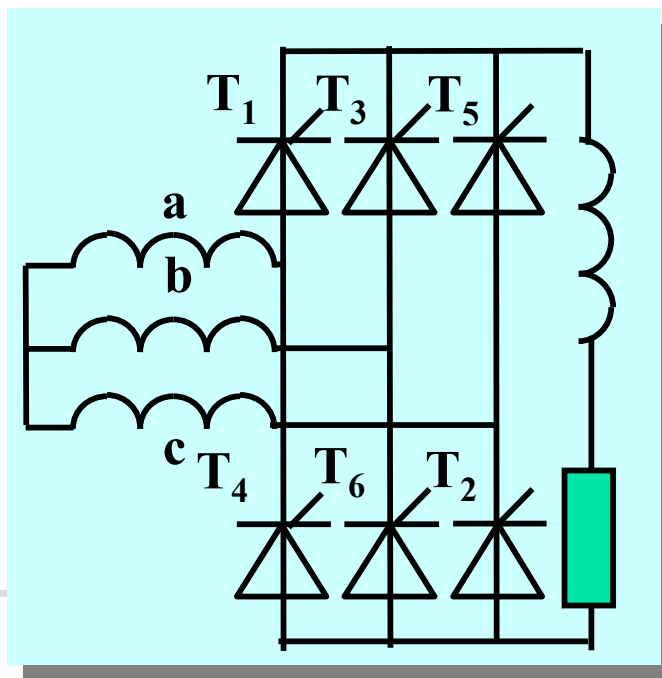
$$U_d = \frac{1}{\pi/3} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\pi} \sqrt{6}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 2.34U_2 [1 + \cos(\frac{\pi}{3} + \alpha)]$$

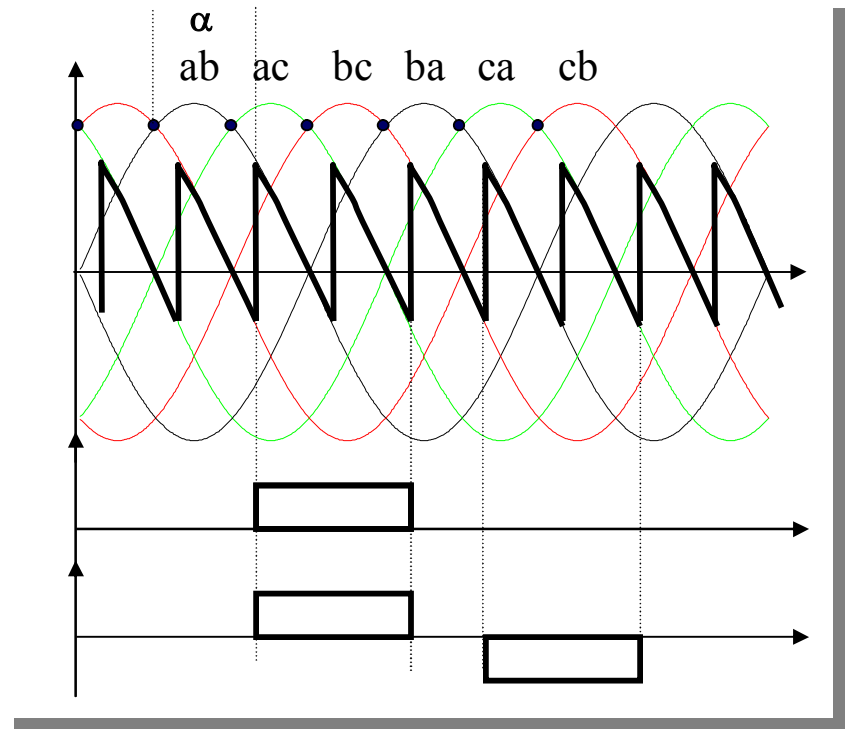
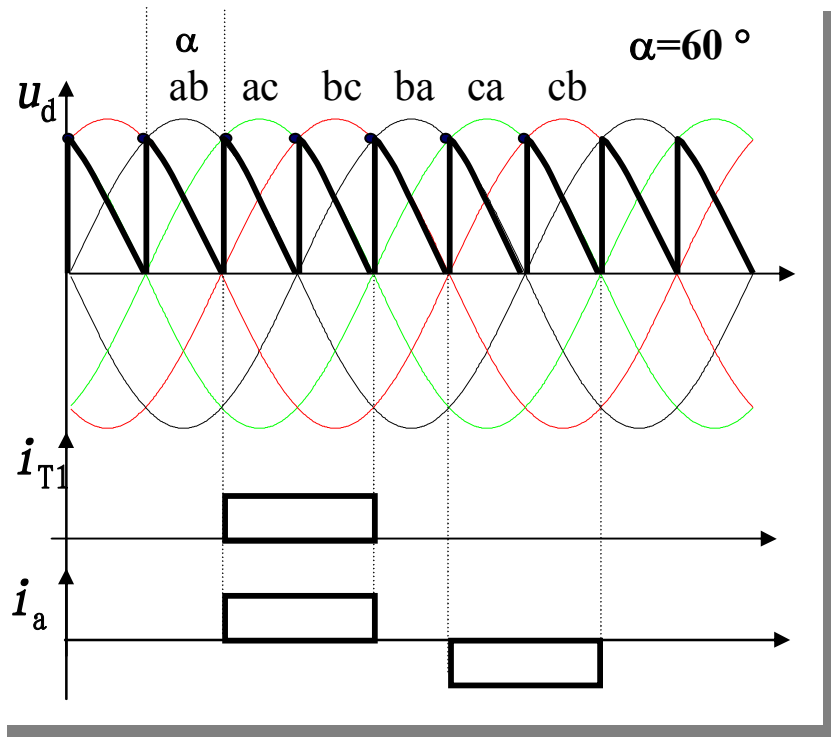
$I_d = \frac{U_d}{R}$ 其它电量，如晶闸管、变压器副边电流有效值要根据波形与定义进行计算。

采用等值电路方法的优点在于直接得到所求量。简单易懂。缺点是物理意义不强。需要半波的基础。

2. 电感电阻负载 (包括电感电阻电势负载)

电路如图。设直流电感足够大。直流电流连续、平直。下面采用等效电路的方法来分析。





当 $\alpha < 60^\circ$ 时 u_d 连续。电路工作与电阻负载时类似。例如过点1后，该线电压 u_{ab} 作用。由于控制角是 α ，所以延迟 α 后将 u_{ab} 投入将 u_{cb} 切除。负载电压就是 u_{ab} 。经 60° 后将 u_{ac} 投入将 u_{ab} 切除。负载电压就是 u_{ac} 其余类似。

当 $\alpha < 60^\circ$ 时由于电感的作用，电流连续虽 u_d 中出现负的部分波形，晶闸管仍然维持导通，直到下次换流为止

当 α 增大时 u_d 就减小因为负的部分增多正的部分减少了。当 $\alpha=90^\circ$ 时正负相等， U_d 为零。其移相范围是 90° 。由于电感的作用，电流连续每个晶闸管都导通 120° 。

主要计算式：

$$U_d = \frac{1}{\pi/3} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \sqrt{6}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 2.34U_2 \cos \alpha$$

$$I_d = \frac{U_d}{R} \quad I_T = \frac{I_d}{\sqrt{3}} \quad I_2 = \sqrt{\frac{2}{3}}I_d$$

$$S_1 = S_2 = 3U_2I_2 = 3U_1I_1 \quad P = U_dI_d$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{U_dI_d}{3U_2I_2}$$



§ 2-7 三相桥式半控整流电路

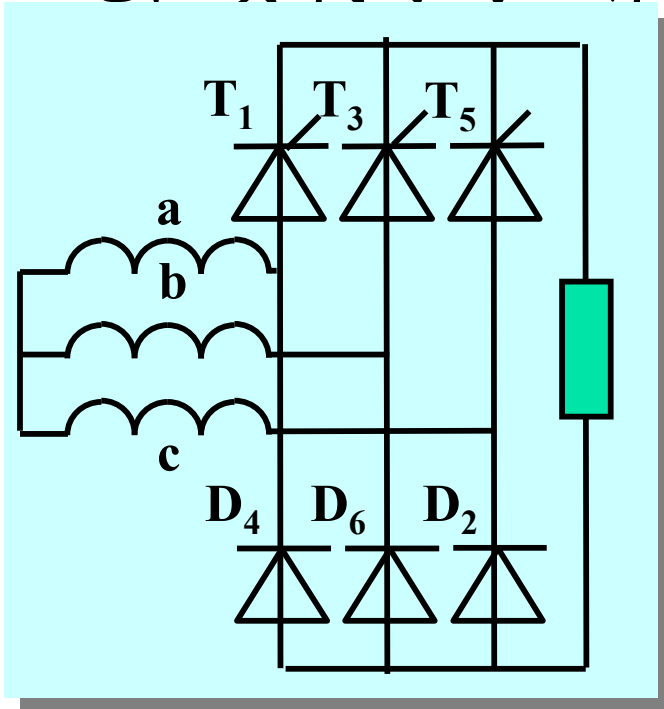
1. 电路的结构: 三相半控桥是共阴极晶闸管三相半波与共阳极二极管三相半波电路的串联。

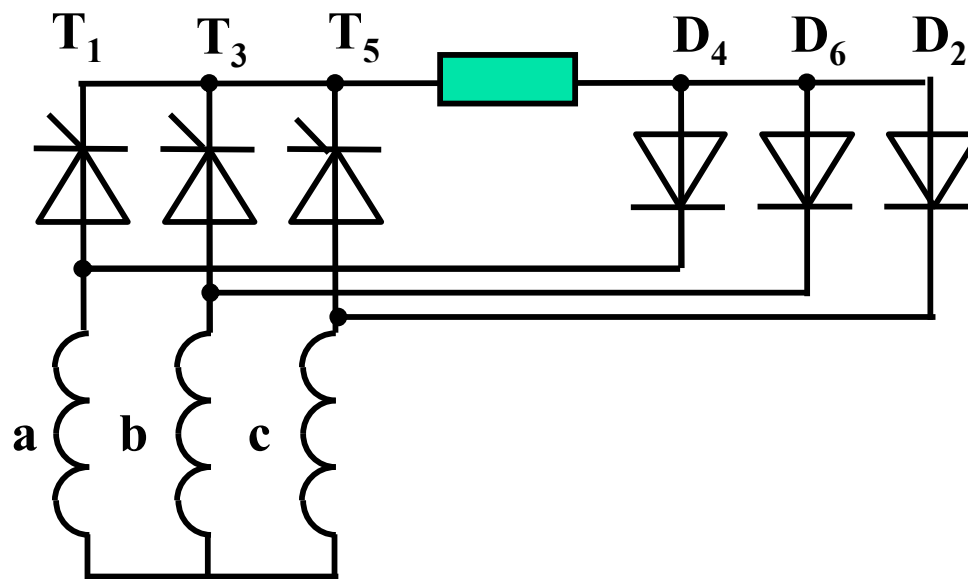
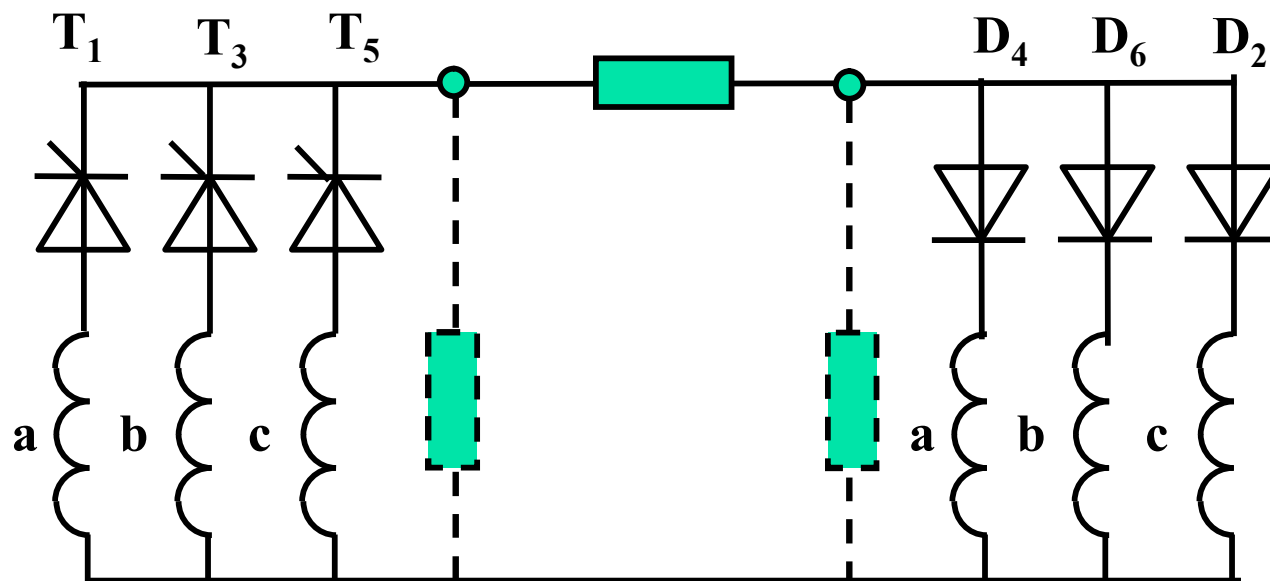
在讨论前应重申: 晶闸管触发换相; 二极管自然换相
在三相半控桥中, 共阳极半波的输出波形是已知的。
分析时只考虑共阴极半波就可以了。

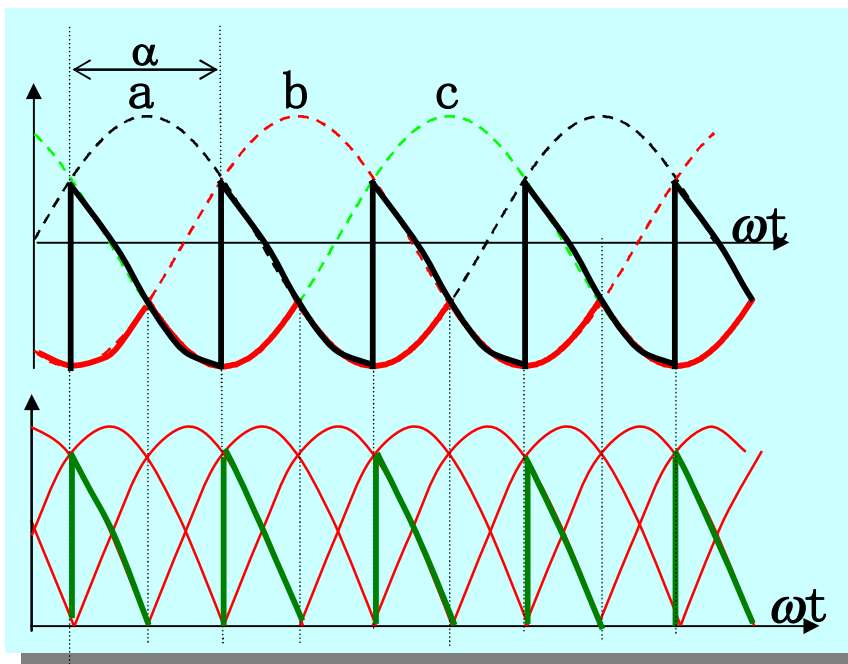
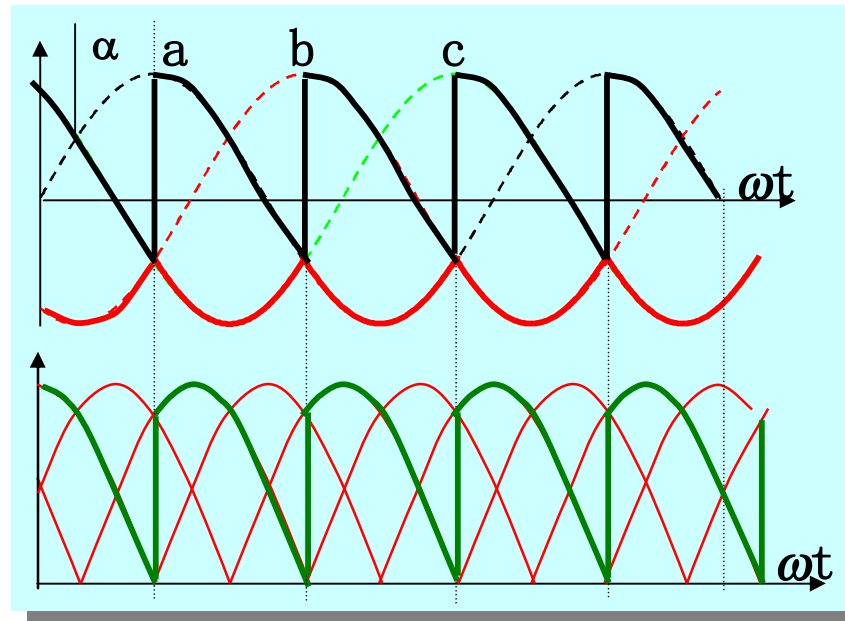
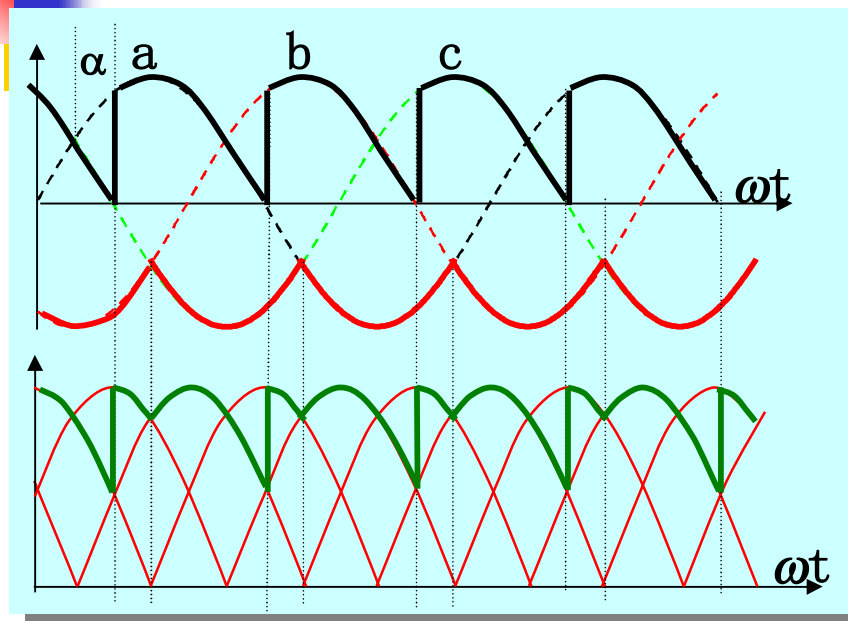
2. 电阻负载时的工作过程: 与三相桥一样, 半控桥的输出是两个半波电路的叠加。

分析步骤是: (1) 确定共阴极半波的控制角与输出; (2) 通过波形叠加得到负载上的电压。

在三相桥中, 作用在负载上的是线电压不是相电压, 确定能否形成导通回路要看线电压。



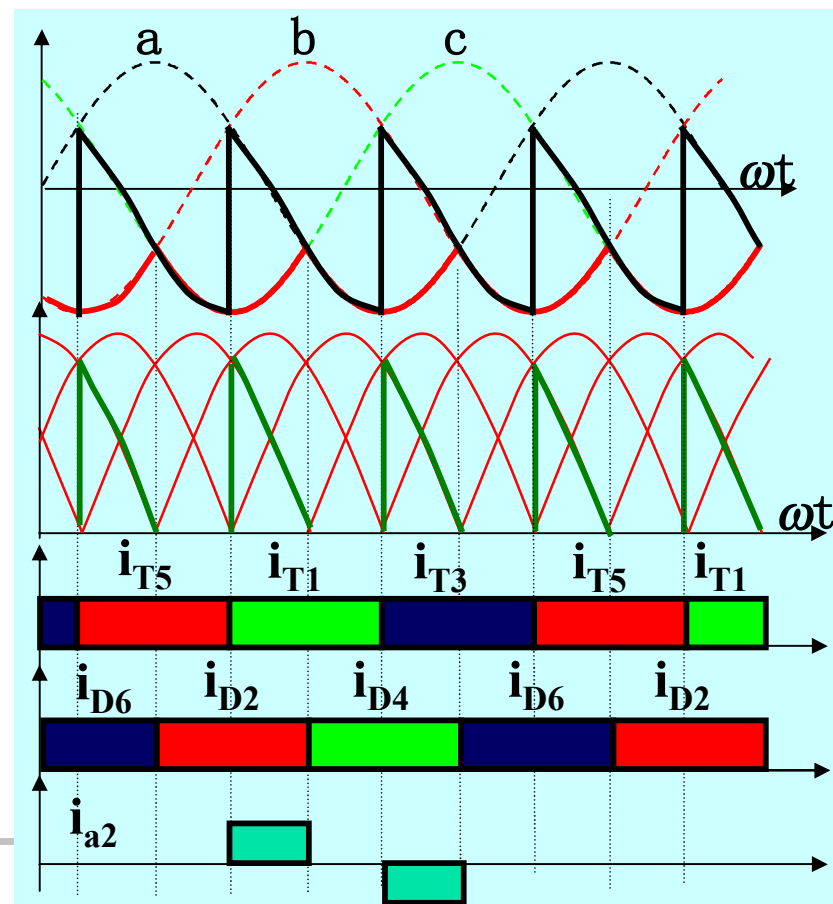




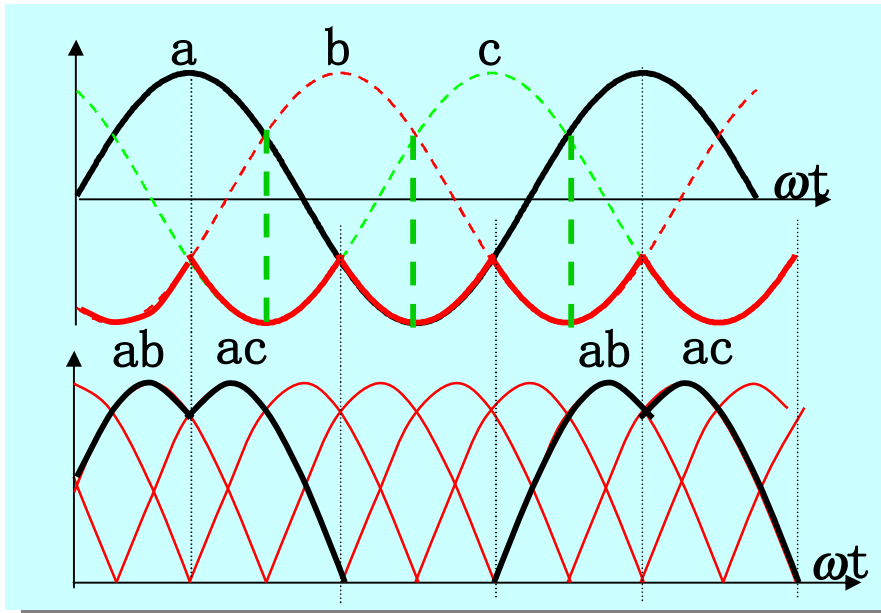
从波形图上知，即使在电阻负载时三相半控桥输出的电压波形与电阻不相同。当 $\alpha < 60^\circ$ 时， u_d 为不对称6个波头当 $\alpha > 60^\circ$ 时 u_d 为三个波头。并出现不连续。其移相范围为 180° 。

2. 电阻电感负载时的工作过程：设直流侧电感足够大当 $\alpha \leq 60^\circ$ 时电路工作与电阻负载相同，只是电流为直线。每个晶闸管与二极管均导通 120° ；当 $\alpha > 60^\circ$ 后电路工作有所不同。设共阴极C相 T_5 与共阳极 D_6 导通。 $u_d = u_{cb}$ ，导通到共阳组的自然换相点， D_2 自然导通，而 T_5 因其电流大于零而不能断于是 T_5D_2 均导通，电路产生续流，输出电压 $u_d = 0$ ，直到共阴半波的晶闸管因触发而换相为止。电压波形如图示

三相半控桥同样会出现失控现象。即在电感性负载电流连续时若去掉触发脉冲会出现一个晶闸管不关断，三个




二极管轮流导通，电路变成三相半波的情况。解决的方法仍然是增加一个续流二极管。这与单相电路相同



例如，设电路原先 T_1D_2 导通，然后 T_1D_4 续流。本应将 T_3 导通使 T_1 关断，但因没有触发 T_3 不能通，所以 T_1 不断。由于电流连续， T_1 继续导通。到共阳自然换相点 D_6 通 D_4 断 $u_d = u_{cb}$ ； D_2 通 D_6 断 $u_d = u_{cb}$

增加一个续流二极管后，电路经续流二极管续流。消除了失控的条件。

主要计算式：不论电阻负载还是电阻电感负载其 u_d 波形相同。所以有相同的计算式。当 $\alpha \leq 60^\circ$ 时 u_d 波形连续，反之不连续。


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

$$= 2.34U_2 \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) \quad \text{当 } \alpha \leq 60^\circ \text{ 时}$$

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

$$= 2.34U_2 \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) \quad \text{当 } \alpha > 60^\circ \text{ 时}$$

输出电压 U_d

$$U_d = 2.34U_2 \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right)$$



其它的计算式应该根据波形图和定义计算。方法同前

讨论：三相半控电路采用半波电路的概念来理解更方便。因为二极管半波的输出是固定的。

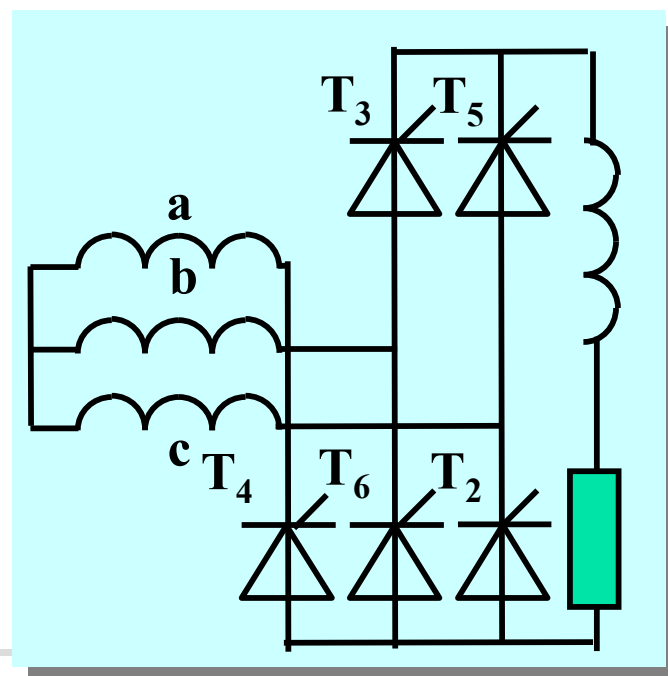
不论什么负载，电压计算式相同。

在电阻负载时也与全控桥的波形不同。

有失控问题。解决方法同样是增加续流二极管。

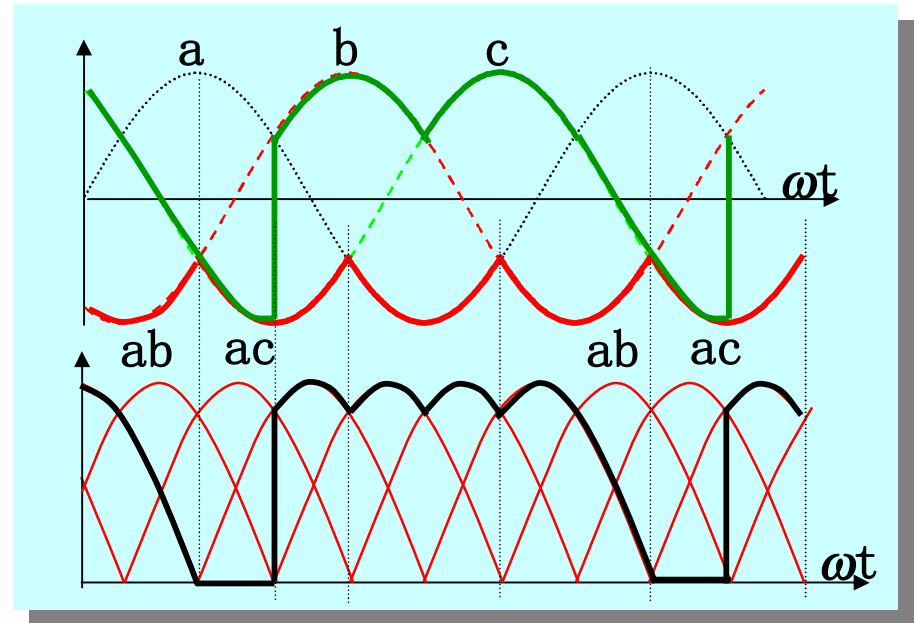
习题与作业

例6. 三相桥，大电感电阻负载。
 $\alpha=0$ 。若 T_1 不能导通，求 U_d 的值。（
本题要表明，半波概念很重要）解：
首先要作出输出电压的波形图。
应用半波电路的知识，分别作出共阴极与共阳极半波的输出



在相电势图上分别作出共阴极半波与共阳极半波的输出再在线电势图上作出线电压波形。这样可计算出 U_d 。

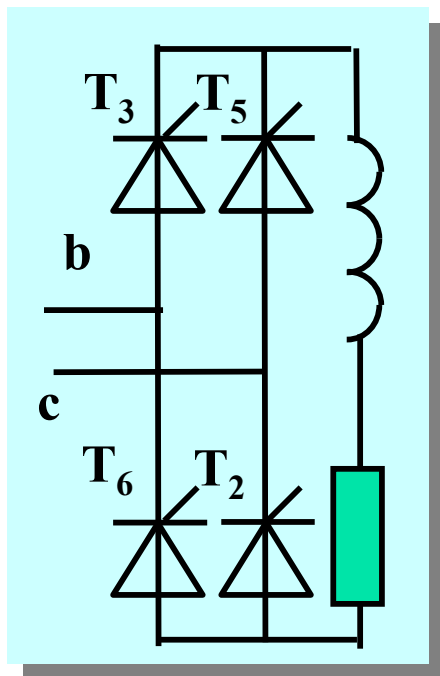
当然也可在线电势图上直接作出波形。不过要有经验。



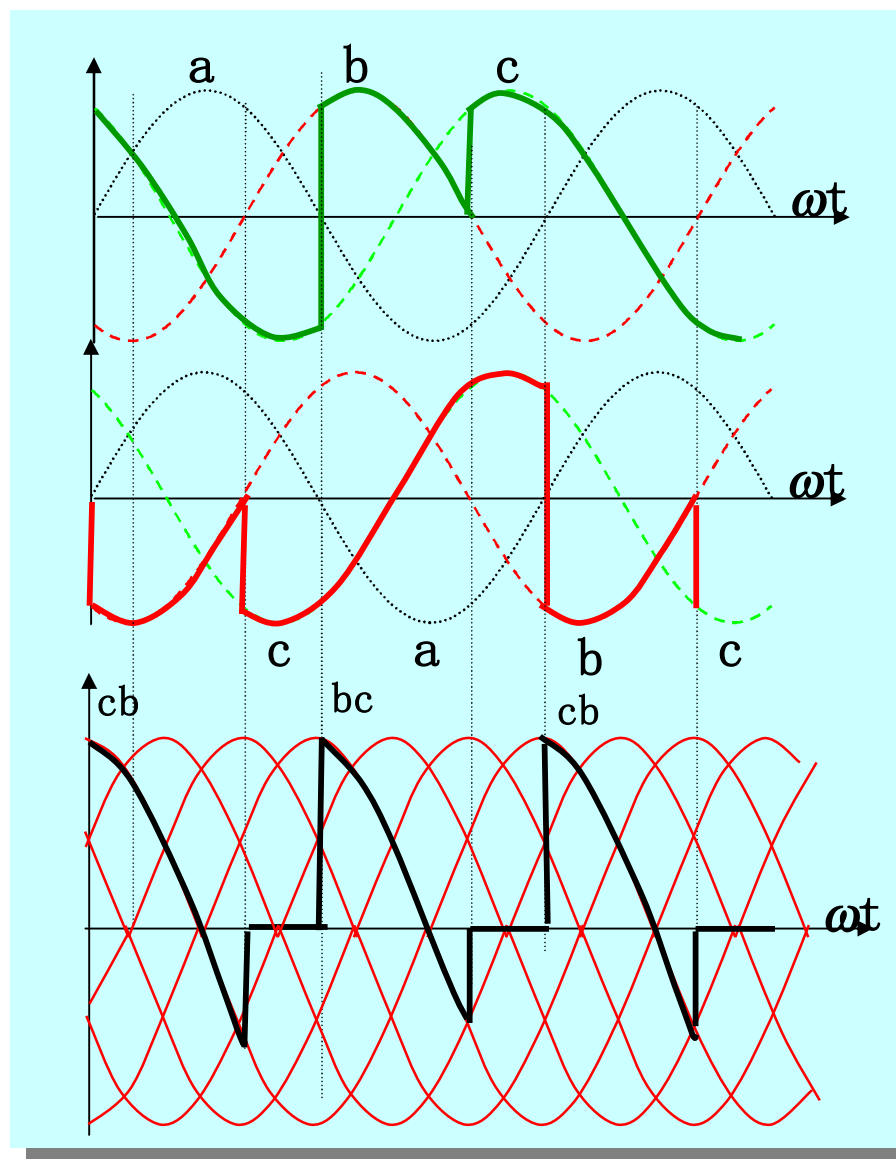
$$U_d = \frac{1}{2\pi} \left[4 \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{6}U_2 \sin \omega t d(\omega t) + \int_0^{\frac{\pi}{3}} \sqrt{6}U_2 \sin \omega t d(\omega t) \right]$$

$$= \frac{\sqrt{6}}{2\pi} U_2 \left(4 + \frac{1}{2} \right) = \frac{9\sqrt{6}}{4\pi} U_2$$

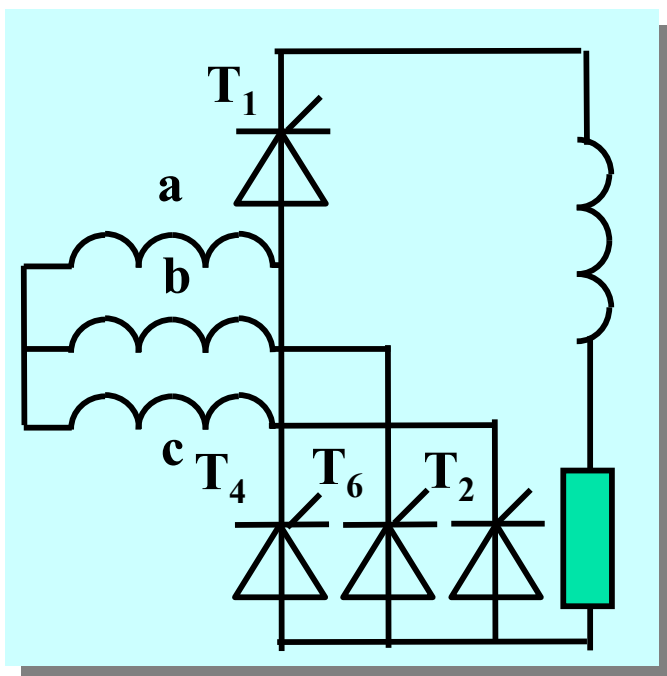
例7. 三相桥，大电感电阻负载， $\alpha=30^\circ$ 。若A相缺失，求 U_d 的波形。



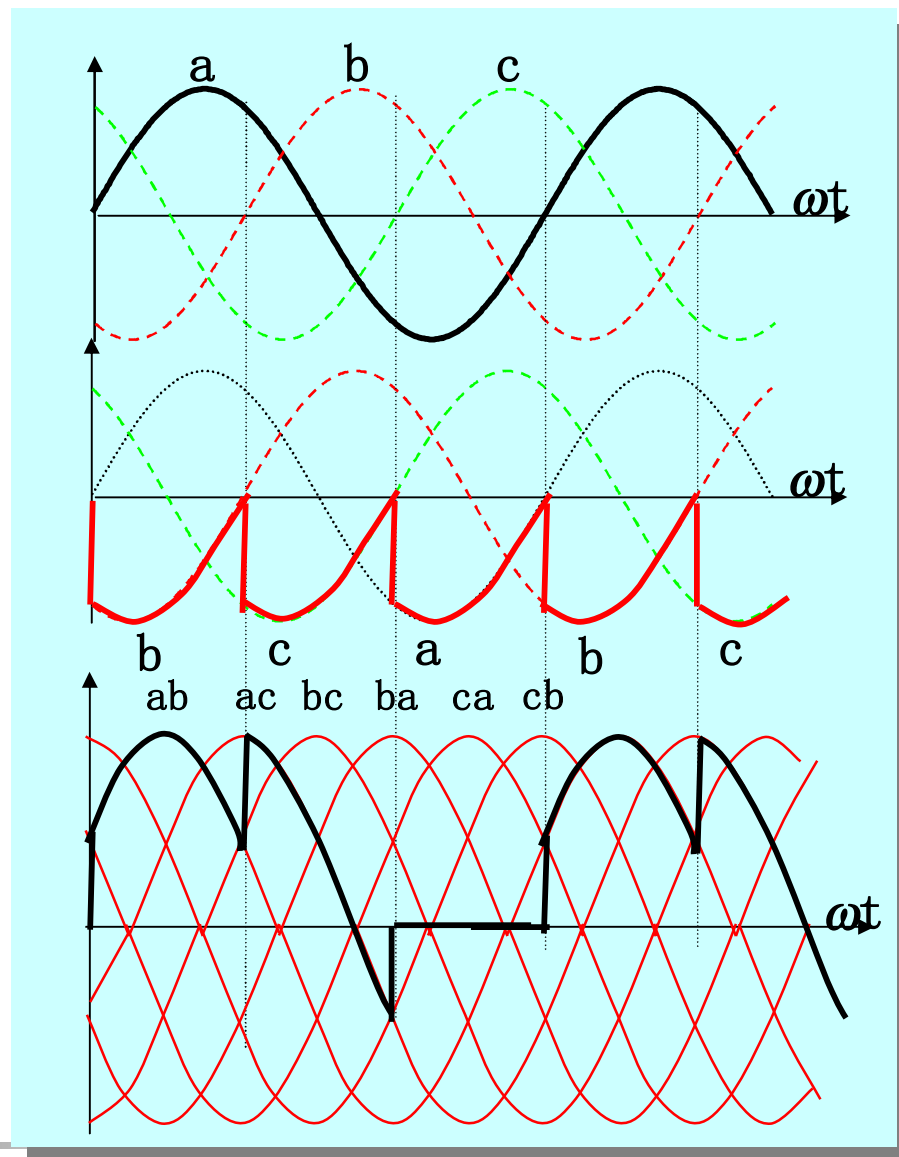
在相电势图上分别作出共阴极半波与共阳极半波的输出再在线电势图上作出线电压波形。



例8. 三相桥，大电感电阻负载， $\alpha=30^\circ$ 。若 T_3T_5 不能导通，绘出 U_d 的波形。



共阴极半波的输出电位为 u_a ，共阳极半波的输出如图。线电压波形是两个电势差。如图。



例9. 三相半控桥电阻负载， $\alpha=30^\circ$ 。若输出直流电压为220伏，电流400安，求各开关有效值、变压器副边电压与电流有效值。

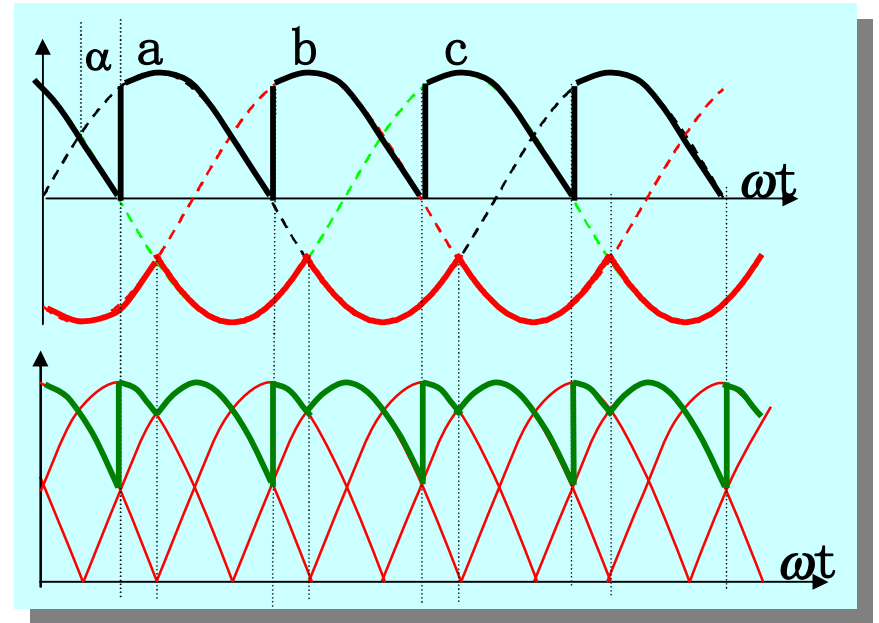
解：作出波形图如图。

$$U_d = 2.34U_2 \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right)$$

$$U_2 = \frac{2U_d}{2.34(1 + \cos 30^\circ)} \approx 100 \text{ (V)}$$

$$I_m = \frac{U_m}{R} = \frac{\sqrt{6}U_2}{220/400} = 445 \text{ (A)}$$

$$I_T^2 = \frac{I_m^2}{2\pi} \left[\int_{\pi/2}^{2\pi/3} \sin^2 \omega t d(\omega t) + \int_{\pi/3}^{5\pi/6} \sin^2 \omega t d(\omega t) \right] = \frac{I_m^2}{2\pi} \left[\frac{\pi}{3} + \frac{3\sqrt{3}}{8} \right]$$



晶闸管与二极管的电流有效值 $I_T = I_D = 231 \text{ (A)}$

器件承受的最大电压值 $V_{Th} = V_D = \sqrt{6}U_2 = 254 \text{ (V)}$

换算成元件的额定电流
(二极管与晶闸管相同) $I_{T(AV)} = \frac{I_T}{\pi/2} = 147 \text{ (A)}$

变压器副边电流有效值 $I_2 = \sqrt{2} \times 231 = 329 \text{ (A)}$

变压器副边容量

$$S_2 = 3U_2I_2 = 3 \times 100 \times 329 = 98.76 \text{ (KVA)}$$



仅内部使用 郭小舟老师

作业:

2.10 2.11 2.13 2.14

