



学习总结：可控整流电路

■ 课程教学大纲——课程学习目标

□ 课程目标1

掌握各种典型电力电子开关器件的静态和动态特性以及器件开关控制方法；掌握基本电力电子/电能变换电路的结构原理、工作原理分析和变换控制技术；

□ 课程目标2

掌握基本电力电子电路的主要技术参数的计算方法、基本性能的分析方法，掌握各种典型电力电子电路的电气性能和应用领域

■ 学习指导

□ 电路结构

□ 开关器件开关控制策略——“控”的内涵：电流的方向和路径、路径持续时间

□ 负载对整流过程的影响

□ 输出电压/电流波形分析

□ 电路元件的电压/电流波形分析

□ 控制特性：整流输出电压/电流与移相/控制角之间的关系

□ 对可控器件的认识：从半控型器件——晶闸管开始

■ 知识点

□ 电路结构：单相→三相；半波→桥式；单元→组合（多重化）

□ 开关器件开关控制策略：

自然换相与相位控制；器件的开通与关断条件；换相与换流

□ 负载对整流过程的影响：

负载性质——电阻；并联电容；电阻+电感；反电势

本质是对晶闸管导通与关断状态的影响；

永恒不变的原则——晶闸管导通与关断的条件；

对晶闸管电流出现/消失时刻、波形变化规律的影响

□ 输出电压/电流波形（电路元件的电压/电流波形）分析

对负载电压波形的“重构”，对负载电流波形的“再造”；

电压重构：由电流“路径”决定；

电流再造：由“路径”元件决定；

□ 控制特性：整流输出电压/电流与控制角之间的关系

整流输出电压平均值的数学/几何/物理意义；

波形与平均值对应的唯一性；

另：波形与“谐波含量”对应的唯一性

□ 对晶闸管的认识：如何开通；如何关断；静/动态特性。



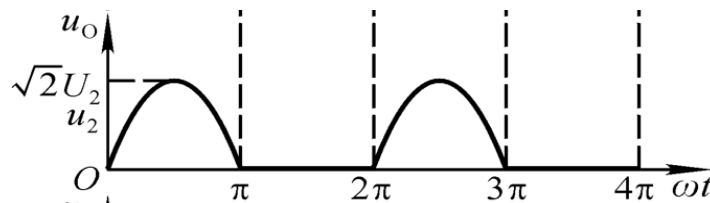
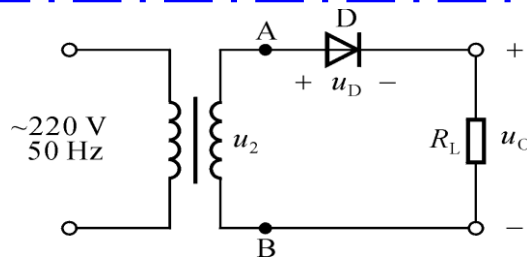
学习总结：可控整流电路

■ 知识点

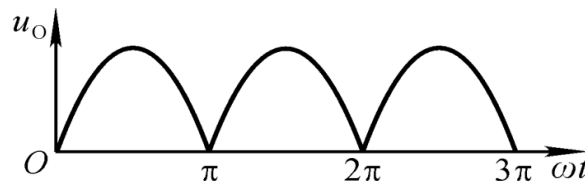
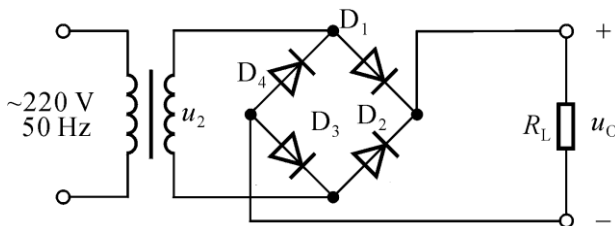
□ 电路结构：不可控→可控；半波→桥式

□ 输出电压波形分析：对负载电压波形的“重构”；电压重构：由电流“路径”决定；

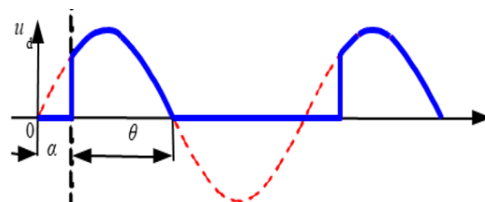
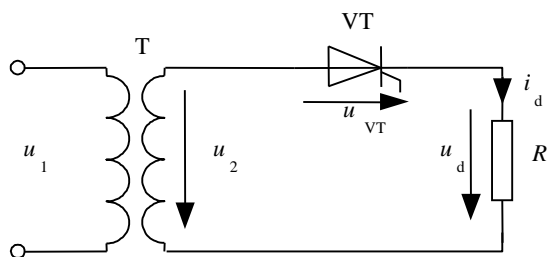
□ 控制特性：整流输出电压与控制角之间的关系；整流输出电压平均值的数学/几何/物理意义；



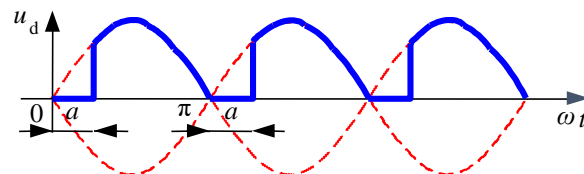
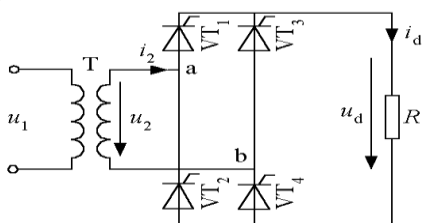
$$U_d = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0.45U_2$$



$$U_{O(AV)} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0.9U_2$$



$$U_d = 0.45U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$



$$U_d = 0.9U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$



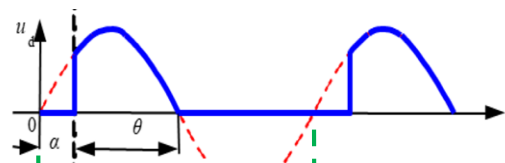
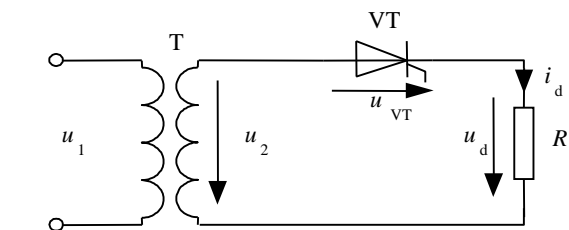
学习总结：可控整流电路

■ 知识点

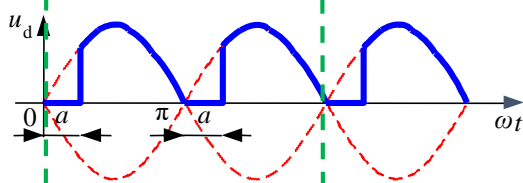
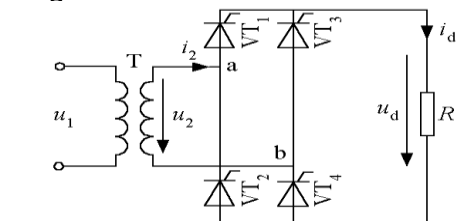
□ 电路结构：单相→三相；

□ 输出电压波形分析：对负载电压波形的“重构”；电压重构：由电流“路径”决定；

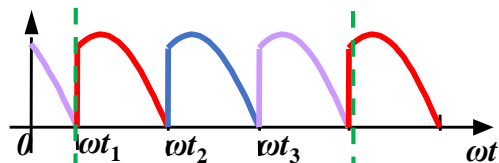
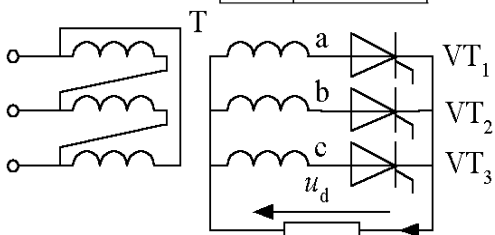
□ 控制特性：整流输出电压与控制角之间的关系；整流输出电压平均值的数学/几何/物理意义；



$$U_d = 0.45 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

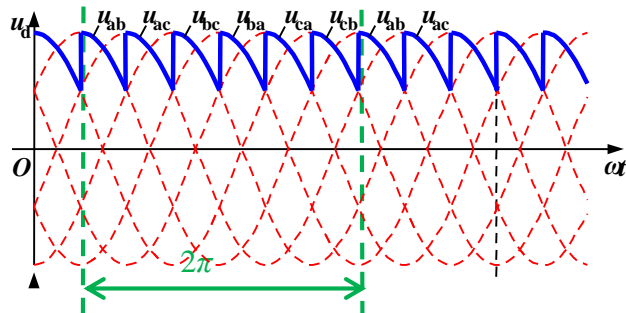
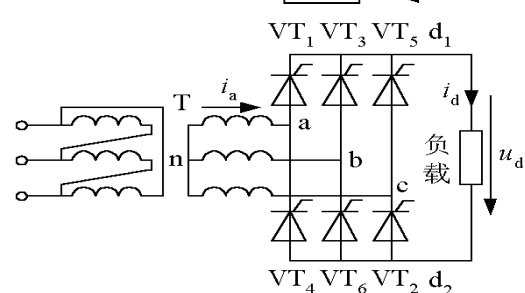


$$U_d = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$



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

$$0.675 \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right]$$



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

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



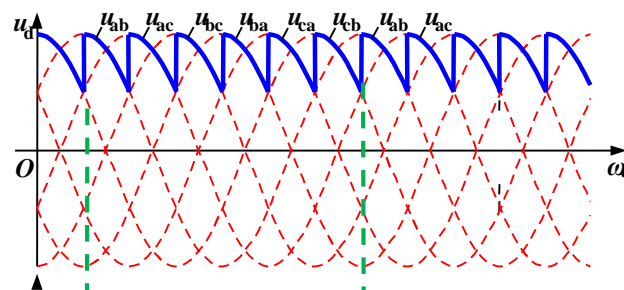
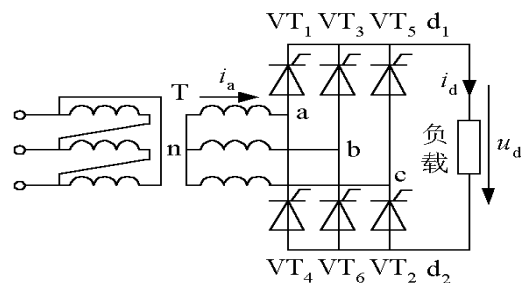
学习总结：可控整流电路

■ 知识点

□ 电路结构：单元→组合（多重化）

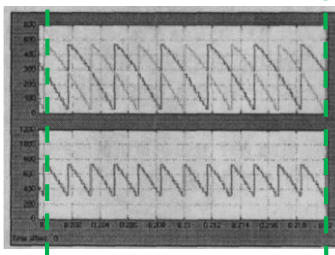
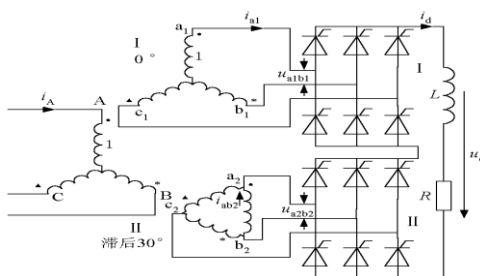
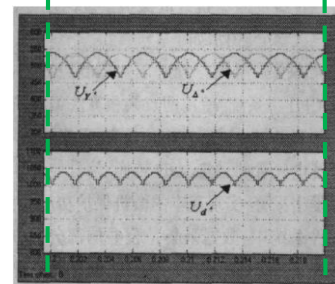
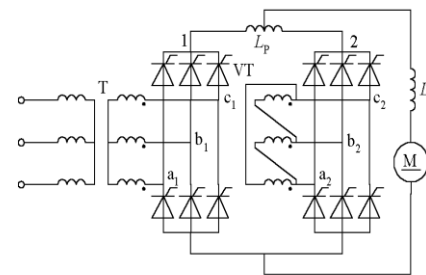
□ 输出电压波形分析：对负载电压波形的“重构”；电压重构：由电流“路径”决定；

□ 控制特性：整流输出电压/电流与控制角之间的关系；整流输出电压平均值的数学/几何/物理意义

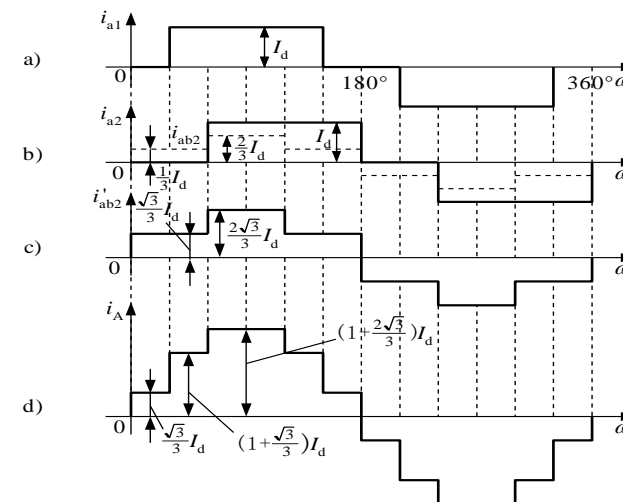


$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \sqrt{6}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 2.34U_2 \cos \alpha$$

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



2π





学习总结：可控整流电路

■ 知识点 负载对整流过程的影响

- 负载性质——电阻；电阻+电感；并联电容；反电势
- 本质是对晶闸管导通与关断状态的影响；
- 对晶闸管电流出现/消失时刻、波形变化规律的影响；
- 永恒不变的原则——晶闸管导通与关断条件的判断



知识点：负载对整流过程的影响

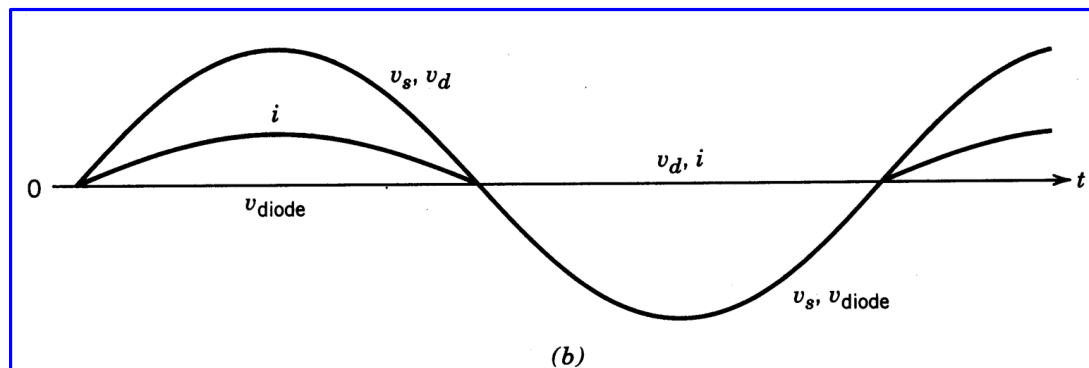
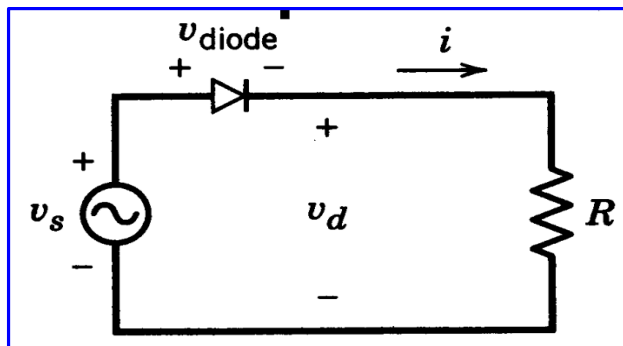


Figure 5-2 Basic rectifier with a load resistance.

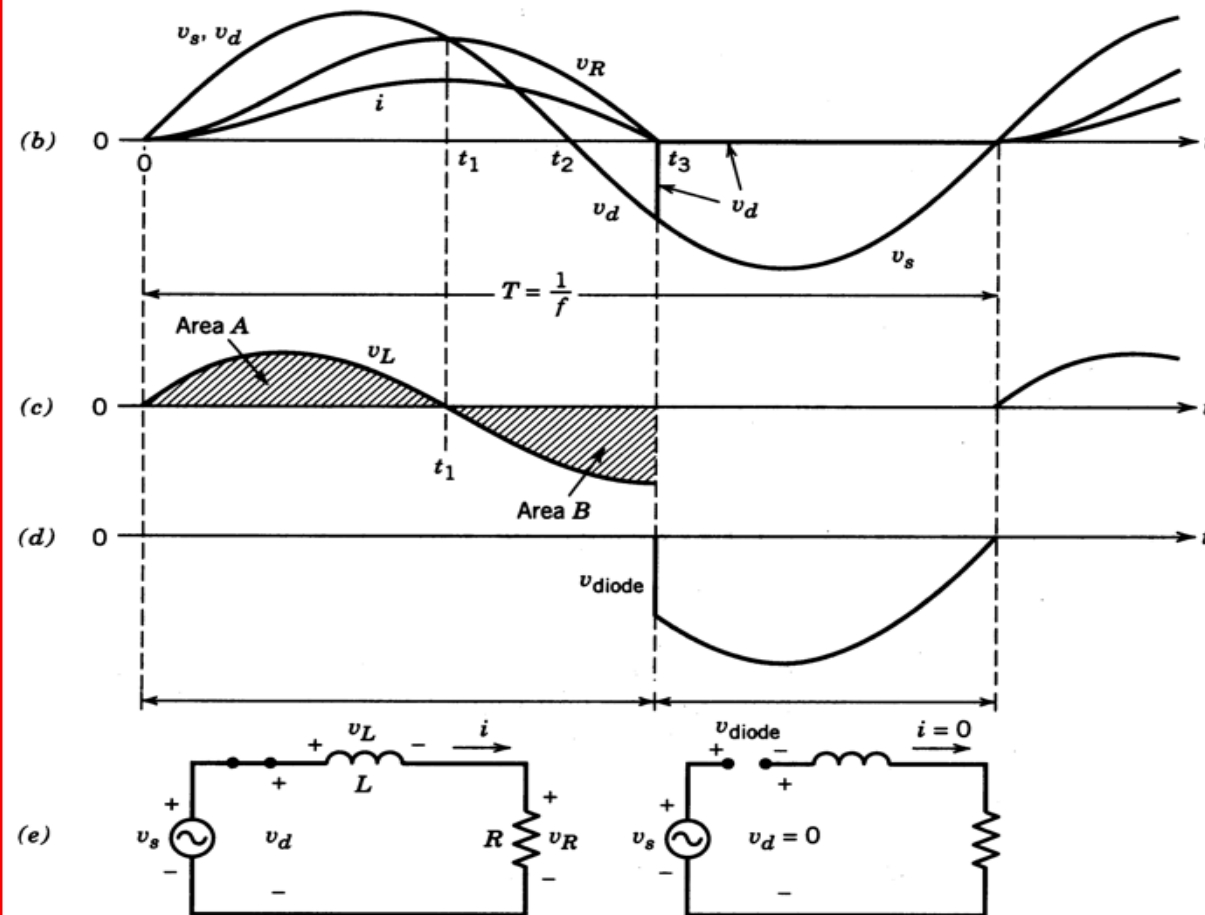
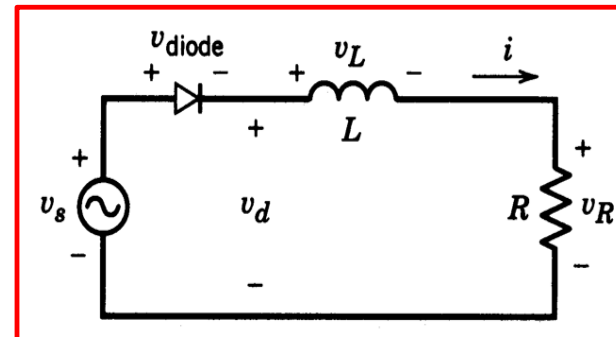


Figure 5-3 Basic rectifier with an inductive load.



知识点：负载对整流过程的影响

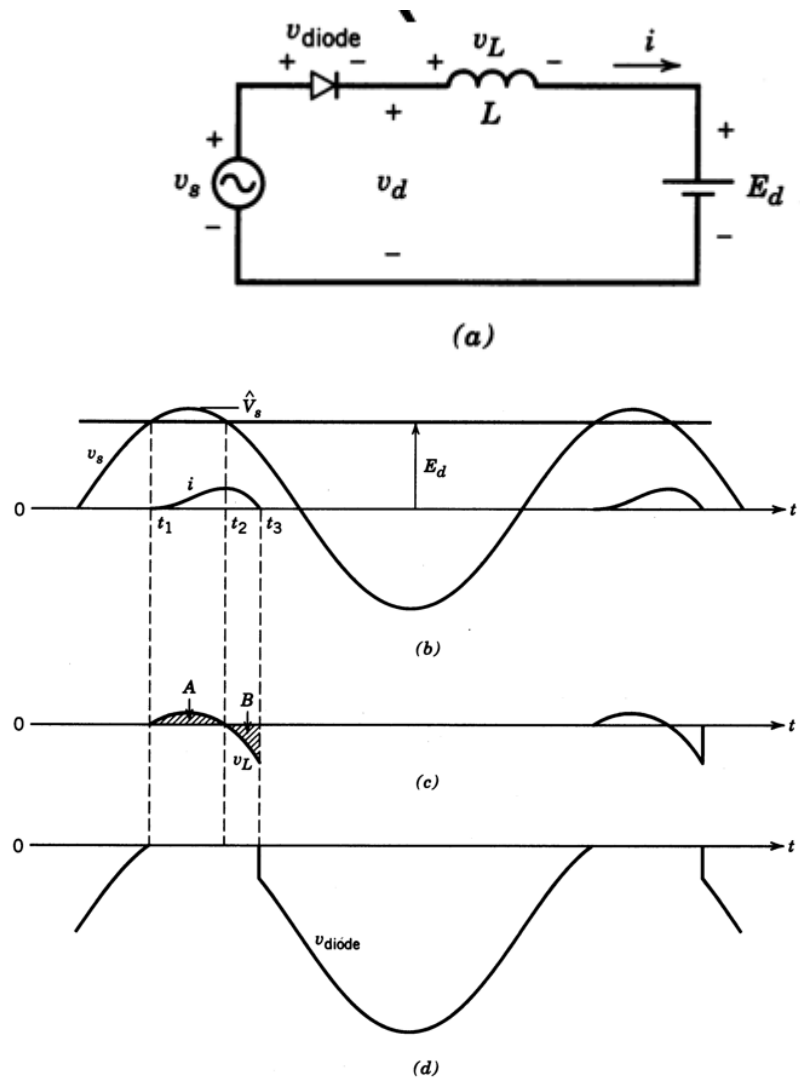


Figure 5-4 Basic rectifier with an internal dc voltage.

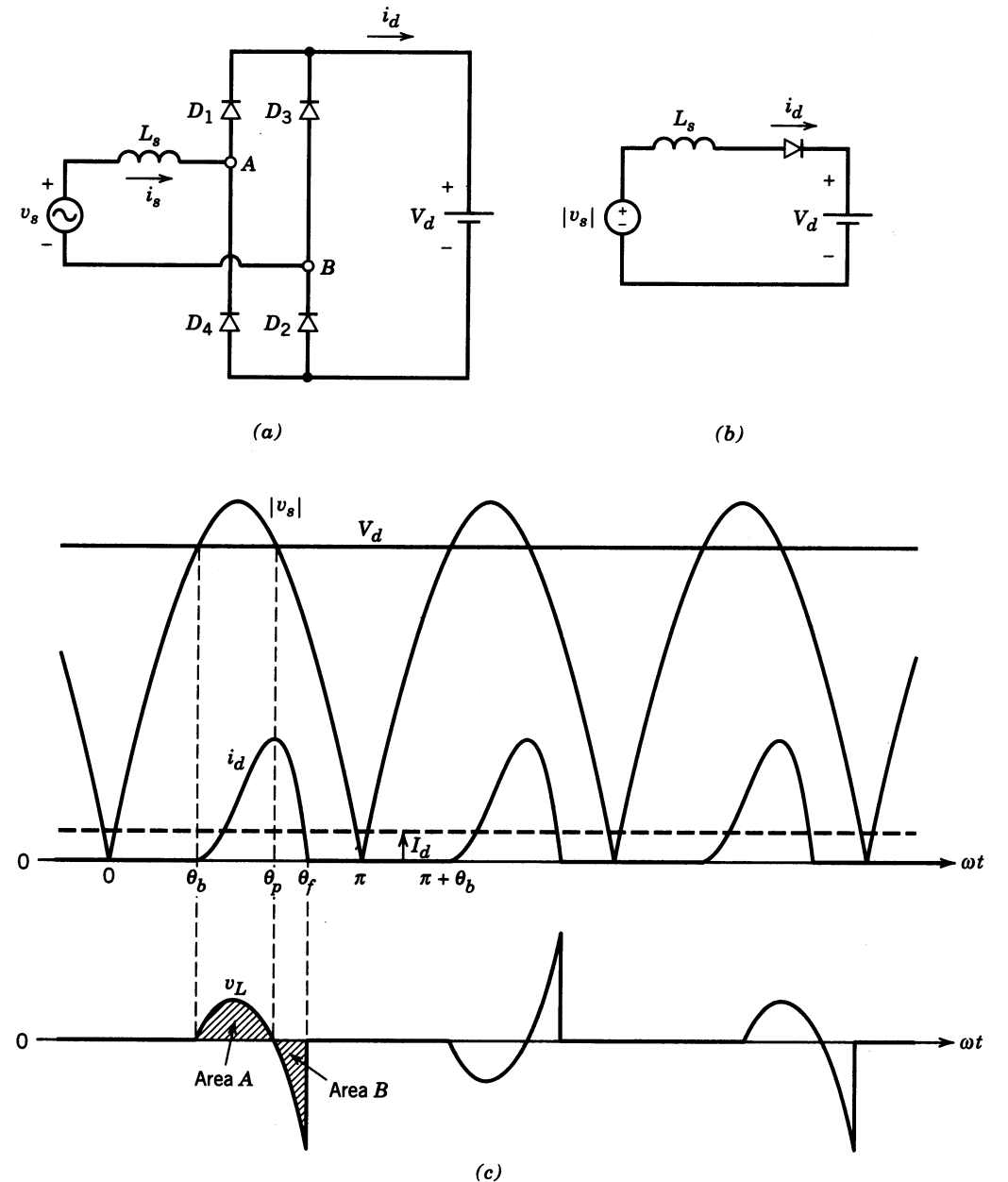
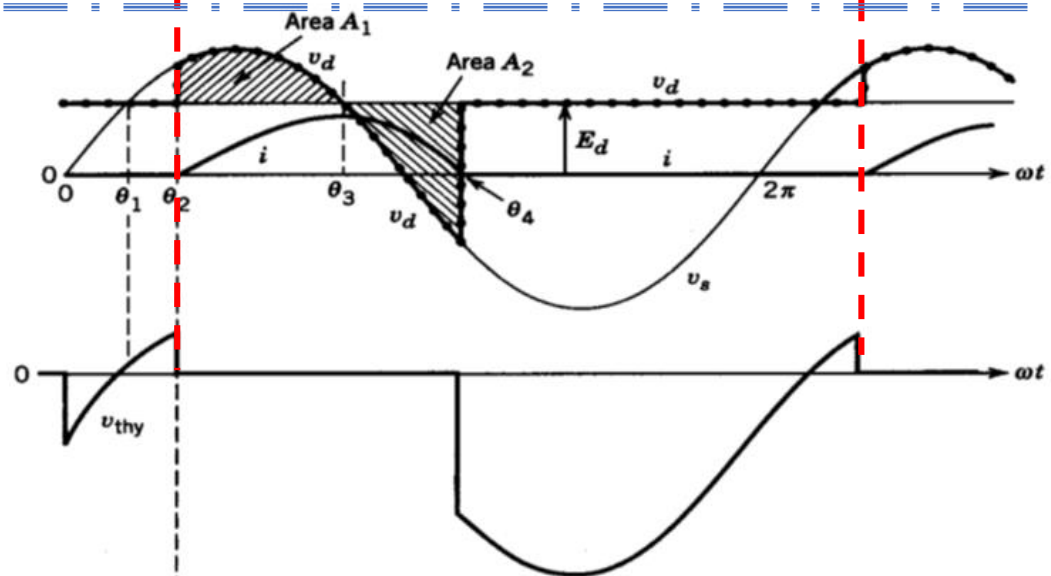
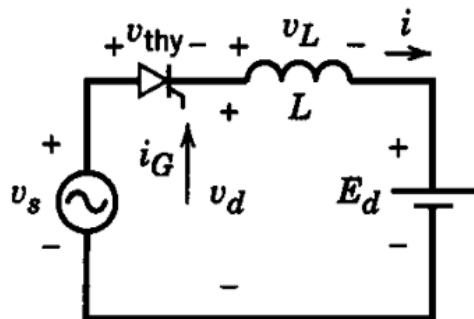
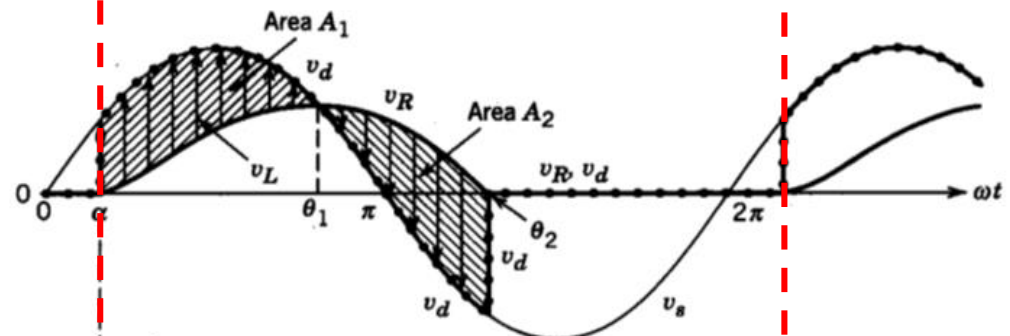
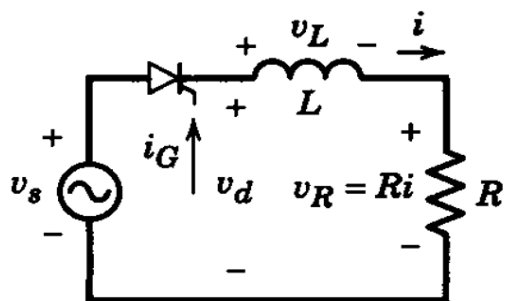
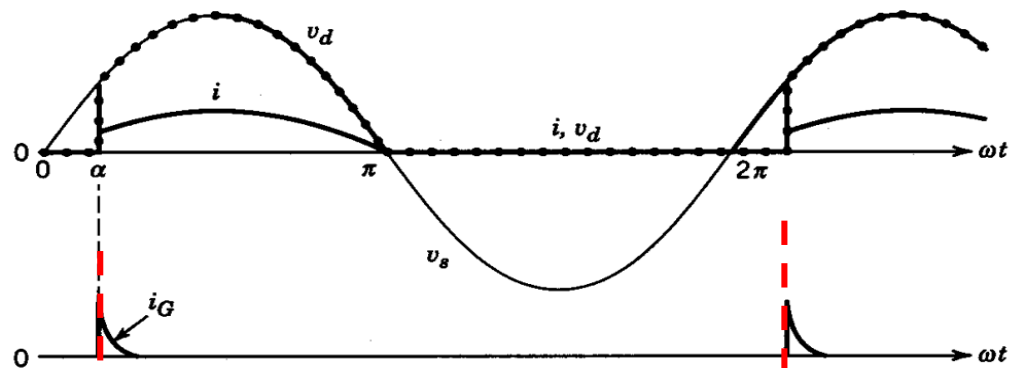
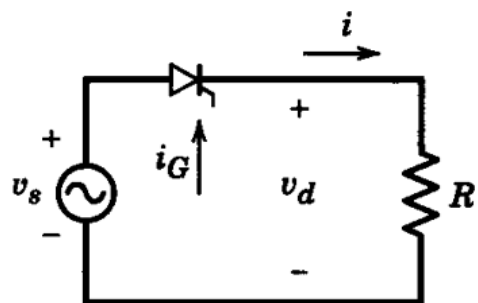


Figure 5-16 (a) Rectifier with a constant dc-side voltage. (b) Equivalent circuit. (c) Waveforms.



知识点：负载对整流过程的影响

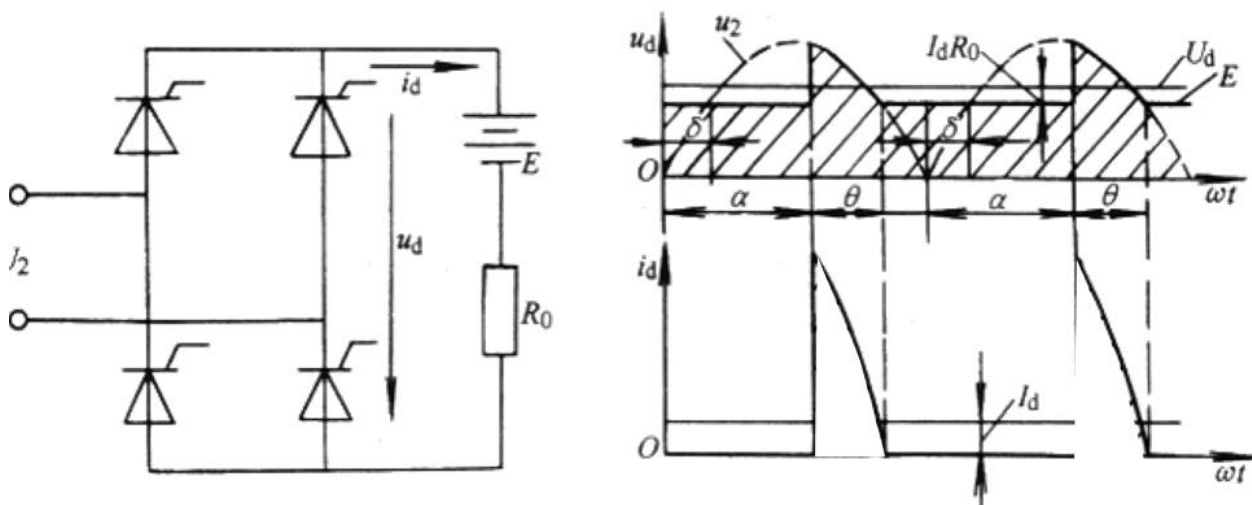




知识点：负载对整流过程的影响

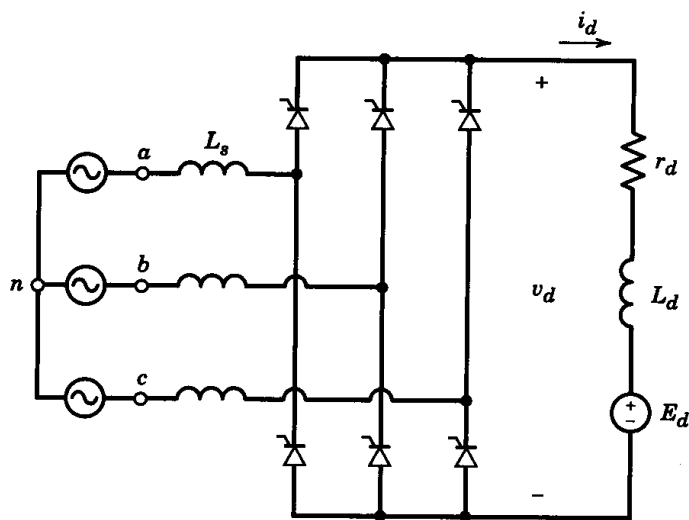
■单相桥式全控整流电路反电动势负载

- ❑ 蓄电池、直流电动机等负载本身具有一定的直流电动势，对整流电路来说是一种反电动势性质的负载。
- ❑ 只有整流电压 u_d 的瞬时值大于负载电动势 E 时，晶闸管才能承受正压而触发导通，电路才有电流 i_d 输出。
- ❑ 当晶闸管导通时， $u_d = u_2 = E + i_d R_0$ ；当晶闸管关断时， $u_d = E$ 。因此，在反电动势负载时，电流断续，负载端直流电压 U_d 比纯电阻负载时有所升高。
- ❑ 即使 $U_d < E$ ，只要 $u_d > E$ ，就有负载电流输出，其瞬时值 i_d 为
$$i_d = \frac{u_d - E}{R_0} \quad (u_d > E)$$





知识点：负载对整流过程的影响



thyristor: 晶闸管 ;

converter: 变换器

Figure 6-28 A practical thyristor converter.

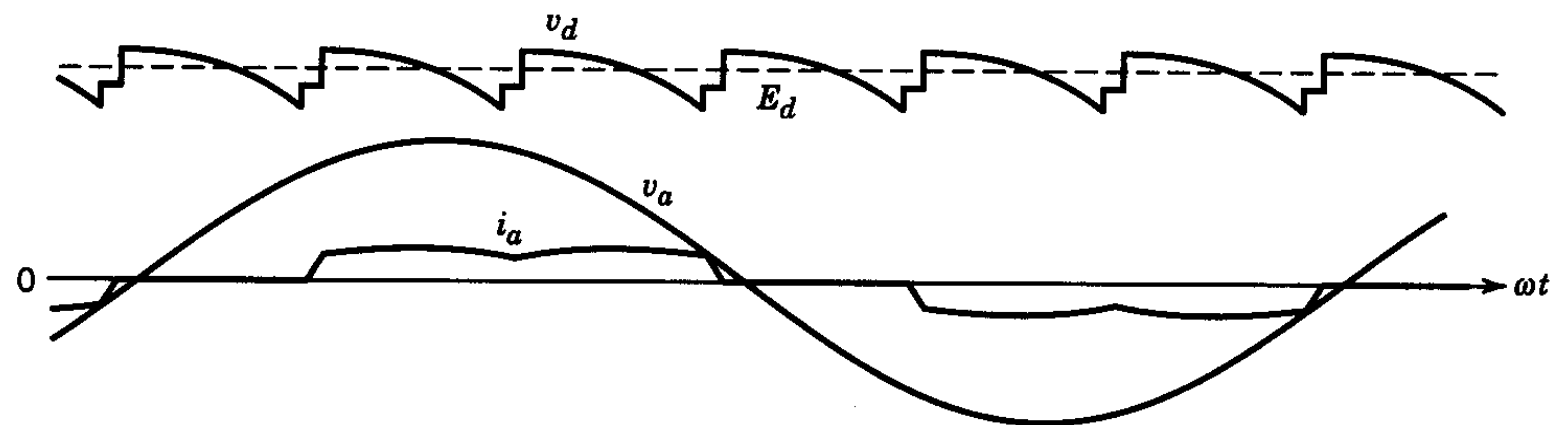
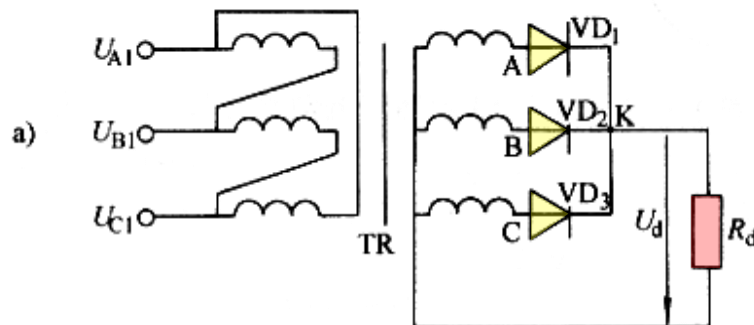


Figure 6-29 Waveforms in the converter of Fig. 6-28.



知识点：相位控制

- “不可控”的本质原因：整流二极管的自然换流（单相）与自然换相（三相）
- “可控”的本质原因：晶闸管开通的可控性
- 自然换相点与 $\alpha=0^\circ$ 点的规定/定义、相位控制与移相范围
 - 单相 or 三相？
 - 三相半波 or 三相桥式？
 - 负载性质对移相范围的影响？





相位控制： u_d 波形的变化过程

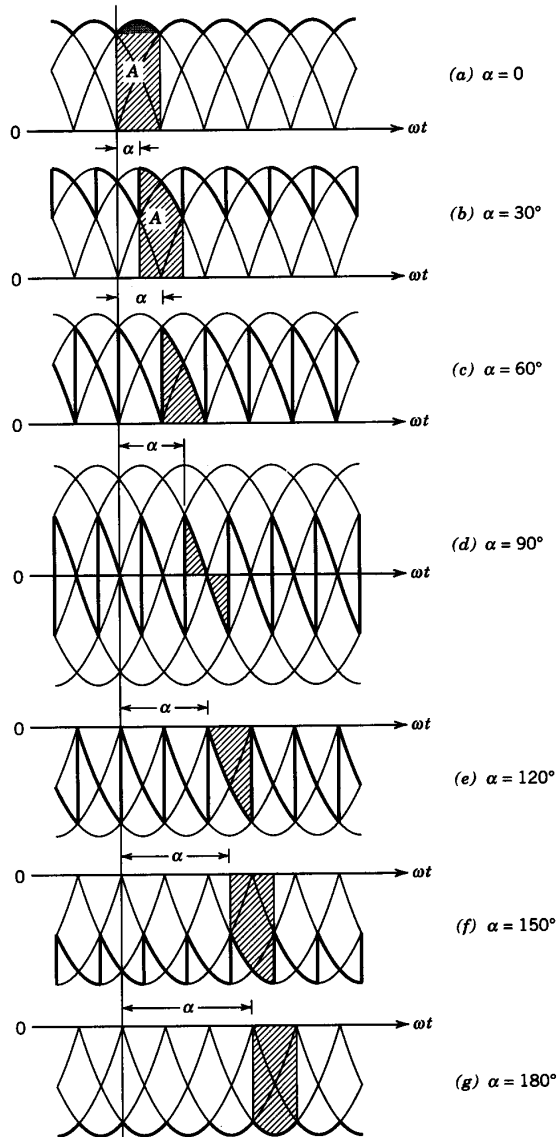


Figure 6-21 The dc-side voltage waveforms as a function of α where $V_{d\alpha} = A/(\pi/3)$. (From ref. 2 with permission.)

知识点： 相位控制

相位控制： 基波电流相位的变化过程

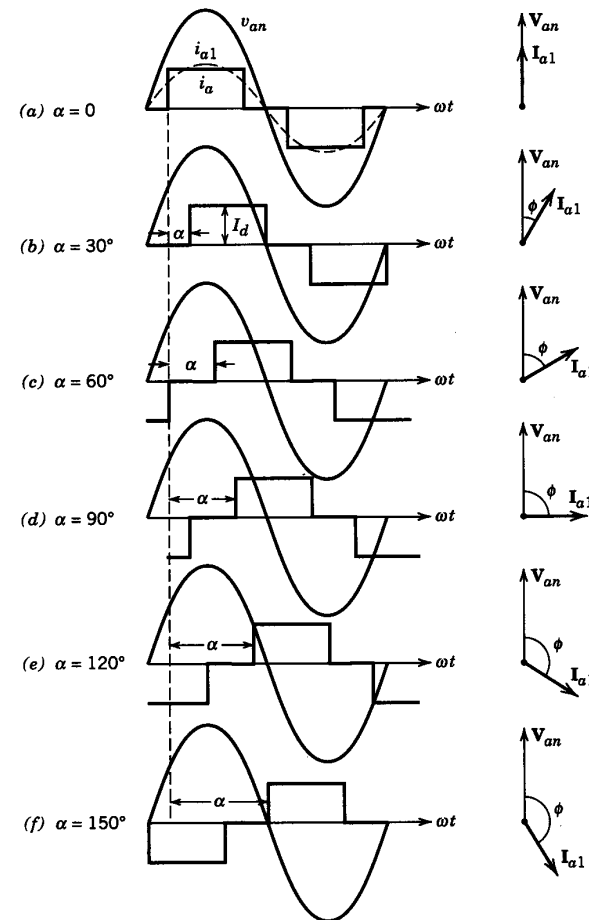


Figure 6-23 Line current as a function of α . (With permission from ref. 2.)



■相位控制：对电流“谐波含量”的影响

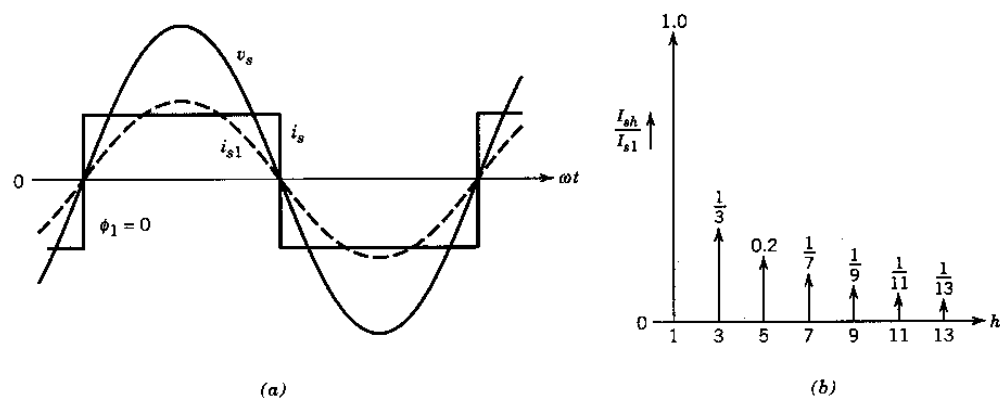


Figure 5-9 Line current i_s in the idealized case.

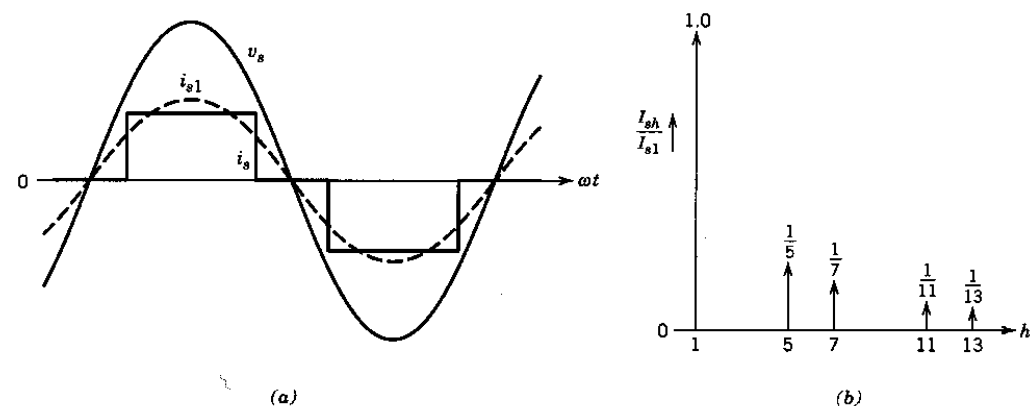


Figure 5-33 Line current in a three-phase rectifier in the idealized case with $L_s = 0$ and a constant dc current.

■References

- 教材：《电力电子技术（V6）》
- 《power electronic-converters, applications, and design》
- 《Fundamentals of Power Electronics》



The End