

第8章 软开关技术

■现代电力电子装置的发展趋势

➤ 小型化、轻量化，对装置的效率和电磁兼容性有更高的要求。

■电力电子电路的高频化

◆优点：滤波器、变压器的体积和重量减小，电力电子装置小型化、轻量化。

◆缺点：开关损耗增加，电路效率严重下降，电磁干扰增大。

■软开关技术

◆降低开关损耗和开关噪声。

◆使开关频率大幅度提高。

◆利用谐振技术，降低开关损耗和开关噪声，
进一步提高开关频率。

学习的主要内容：

- 软开关的基本概念
- 软开关电路分类和基本电路
- 典型的软开关电路

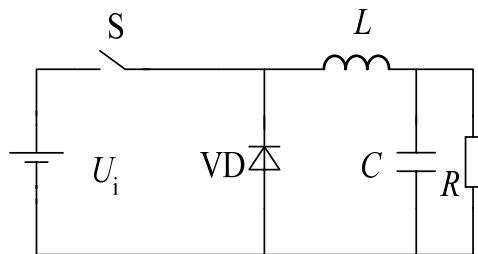
掌握的内容：

- 软开关的概念和开关过程
- 软开关电路的分类、基本结构及应用
- 软开关电路的工作原理、分析、有关计算

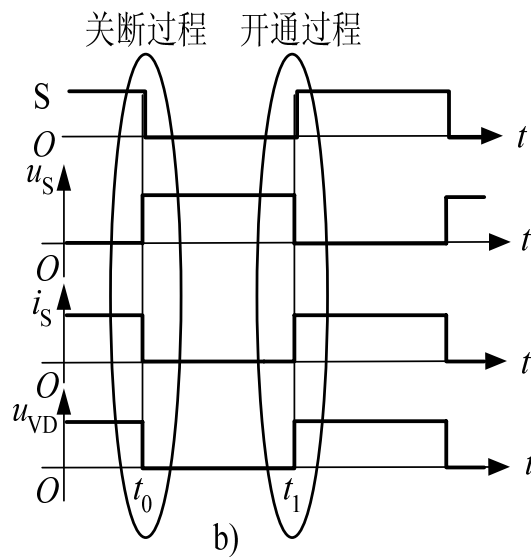
8.1 软开关的基本概念

8.1.1 硬开关与软开关

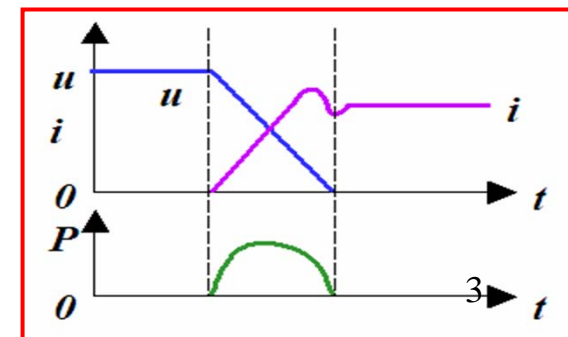
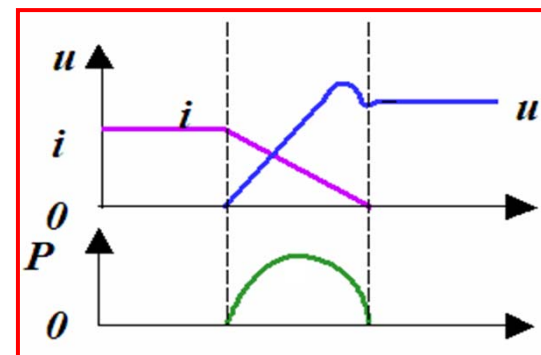
- 硬开关：以前所学所有电路的开关过程为硬开关。如图所示BUCK电路。
- ◆ 电压、电流均不为零，出现了重叠，有显著的开关损耗。
- ◆ 电压电流变化很快，波形出现明显过冲，产生了开关噪声。
- ◆ 开关损耗与开关频率之间呈线性关系，因此当硬电路的工作频率不太高时，开关损耗占总损耗的比例并不大，频率越高，开关损耗越大。



a)

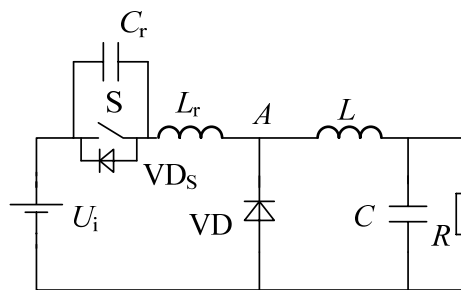
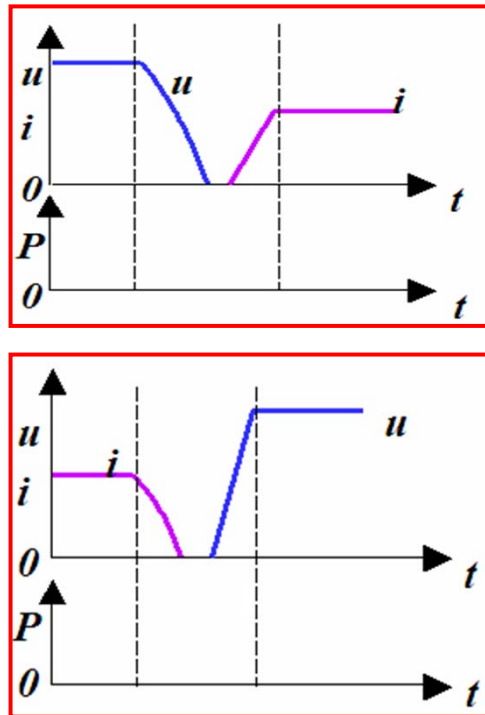


b)

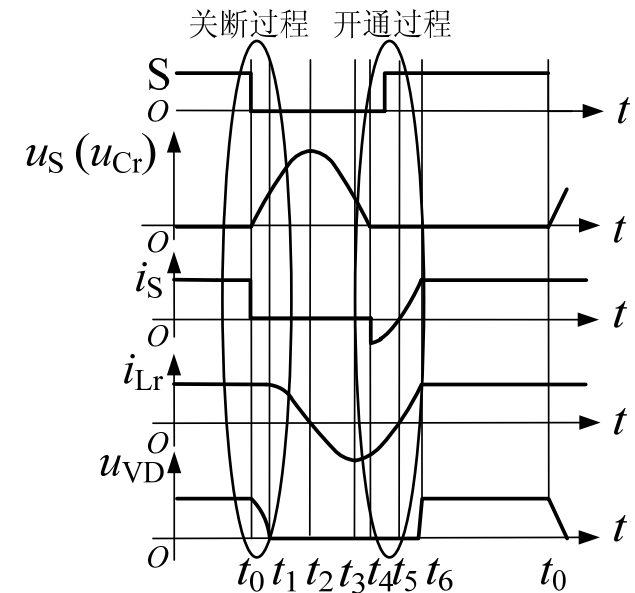


■ 软开关

- ◆ 在原电路中增加了谐振电感 L_r 、谐振电容 C_r ，反并联二极管 VD_S ，与滤波电感 L 、电容 C 相比， L_r 和 C_r 的值小得多。
- ◆ 在开关过程前后引入谐振，使开关开通前电压先降到零，关断前电流先降到零，消除了开关过程中电压、电流的重叠，从而大大减小甚至消除开关损耗，开关频率有望提高。谐振过程限制了开关过程中电压和电流的变化率，减小了开关噪声。如图所示电路的开通过程。



a)



b)

8.1.2 零电压开关与零电流开关

零电压开关 - 零电压开通:

使开关开通前其两端电压为零, 则开关开通时就不会产生损耗和噪声。

零电流开关 - 零电流关断:

使开关关断前其电流为零, 则开关关断时也不会产生损耗和噪声。

零电压关断:

把并联电容能使开关关断后电压上升延缓, 降低关断损耗的过程。

零电流开通:

把串联电感能使开关开通后电流上升延缓, 降低开通损耗的过程。

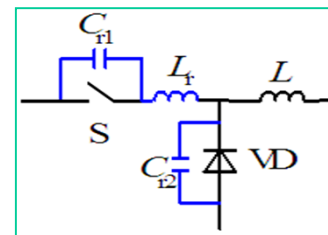
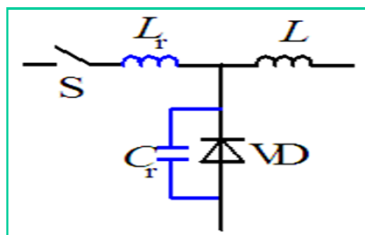
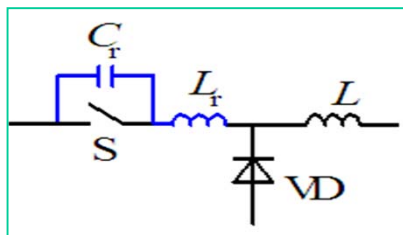
8.2 软开关电路的分类

- ◆按开关元件的电压电流状态：**零电压电路**（零电压开通）和**零电流电路**（零电流关断）。个别电路中有多多个软开关，有些开关是零电压开通的，另一些开关是零电流关断的。
- ◆按软开关技术的发展过程：**准谐振电路**、**零开关PWM电路**和**零转换PWM电路**。

1. 准谐振电路

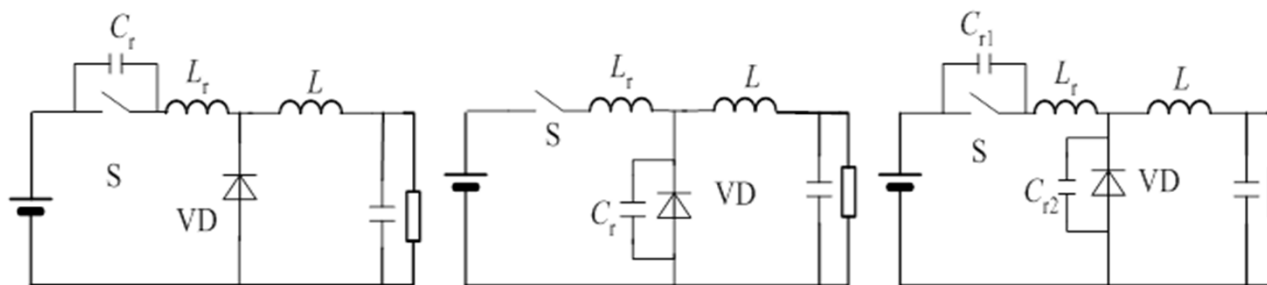
◆ 分类

零电压开关准谐振电路，零电流开关准谐振电路，零电压开关多谐振电路



用于逆变器的谐振直流环节

准谐振电路：在准谐振电路中电压或电流的波形为**正弦半波**。



特点：

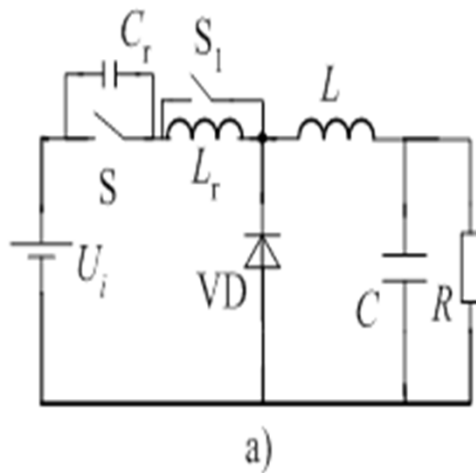
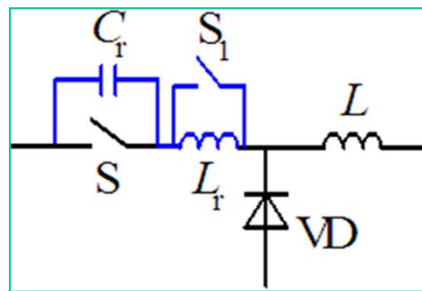
- 谐振电压峰值很高，要求开关器件耐压高；
- 谐振电流有效值很大，电力变换电路中无功功率交换量大，电路中损耗大；
- 谐振周期随输入电压、负载变化而改变，适用脉冲频率调制方式来控制电力变换电路。

2. 零开关PWM电路

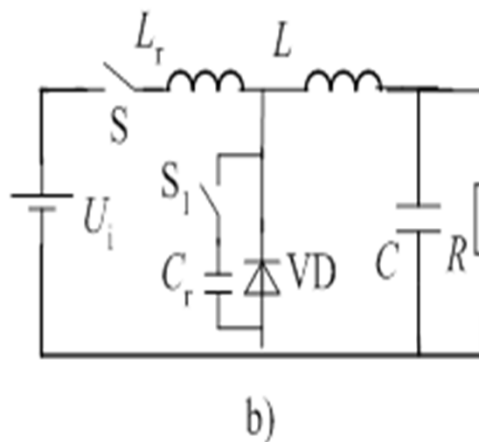
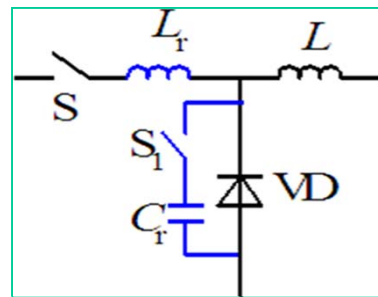
在准谐振电路中，用辅助开关控制谐振的开始，使谐振仅发生于开关过程前后。而其它时间为PWM电路工作。

◆分类

零电压开关PWM电路



零电流开关PWM电路



特点:

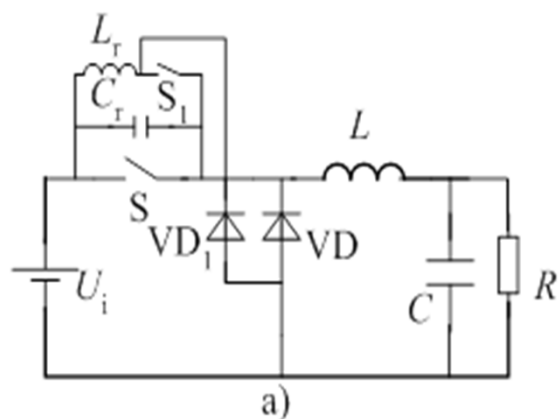
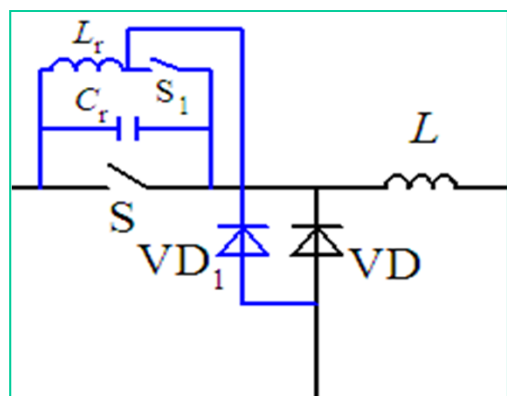
- 电压和电流基本上是上升沿和下降沿较缓方波，开关承受的电压明显降低；
- 电路可采用开关频率固定的PWM控制方式。

3. 零转换PWM电路

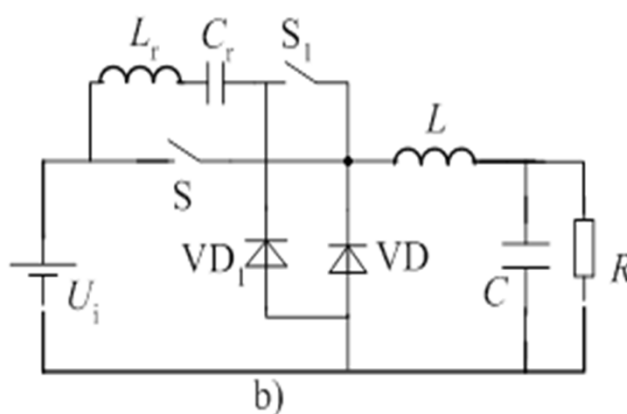
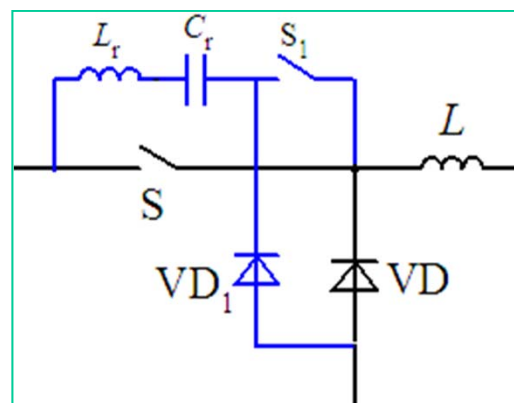
采用辅助开关控制谐振的开始时刻，但与零开关PWM不同的是，谐振电路是与主开关并联的。

◆ 分类

零电压转换PWM电路



零电流转换PWM电路



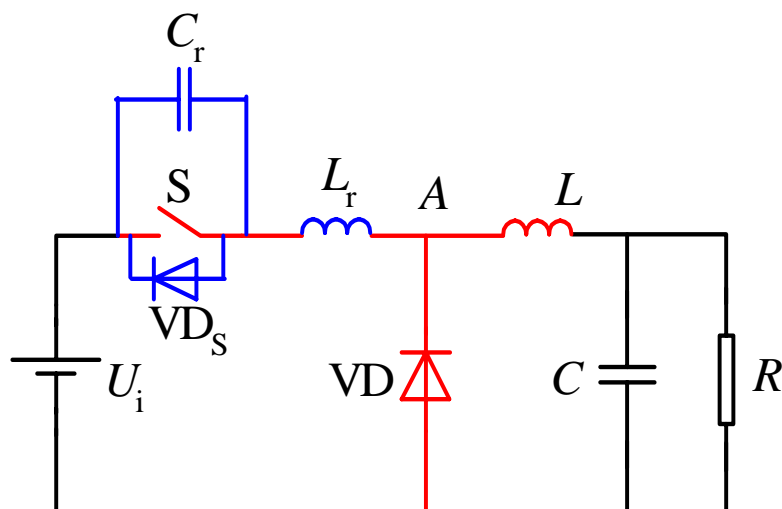
特点:

- 输入电压和负载电流对电路的谐振过程的影响很小，电路在很宽的输入电压范围内和从零负载到满载都能工作在软开关状态。
- 电路中无功功率的交换被削减到最小，这使得电路效率有了进一步提高。

8.3 典型的软开关电路

分析软开关电路的工作过程，如何在开关过程产生谐振、减小开关损耗。重点是开关过程。

8.3.1 零电压开关准谐振电路



◆假设 L 和 C 很大，可等效为**电流源**和**电压源**，并忽略电路中的**损耗**。

◆工作过程按**开关周期**重复，分析一个周期，可选择任意时刻为分析的起点，选择**合适的起点**，可使分析得到简化。

准谐振：仅谐振了半个周期

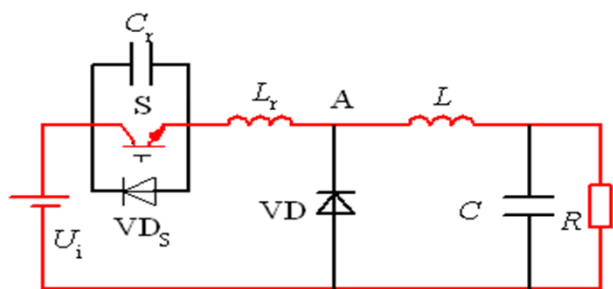
工作思路：根据电路结构， S 具有零电压关断的特性， C_r 、 L_r 产生谐振，使得两端出现零电压后（是与其反并联的二极管导通，出现很小的负管压降），给 S 开通信号，实现零电压开通，即软开关工作。

◆ 工作过程

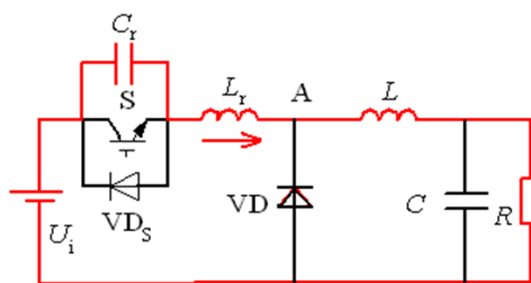
- 选择开关S的关断时刻 t_0 为起点分析。
- t_0 之前，S导通，VD为断态， $u_{Cr}=0$ ， $i_{Lr}=I_L$ 。PWM电路工作模式。如图电路。
- $t_0 \sim t_1$ 时段：谐振电容电压线性上升（电感电流保持恒定）阶段。如图电路。

t_0 时刻S关断， C_r 电压开始减缓上升， L 很大，电流不变， L_r+L 以恒流向 C_r 充电， u_{Cr} 线性上升，同时VD两端电压 u_{VD} 逐渐下降，直到 t_1 时刻， $u_{VD}=0$ ，VD导通，这一时段 u_{Cr} 的上升率为

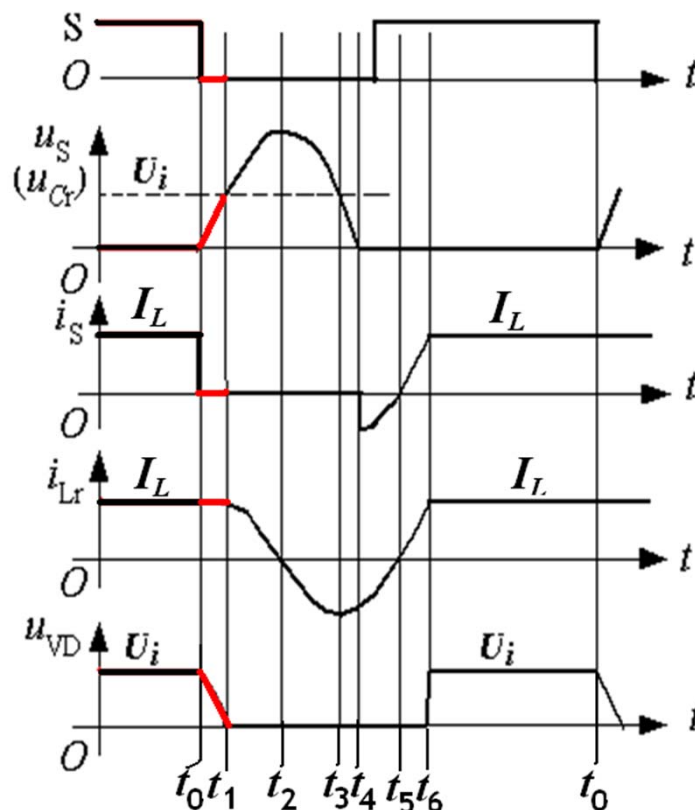
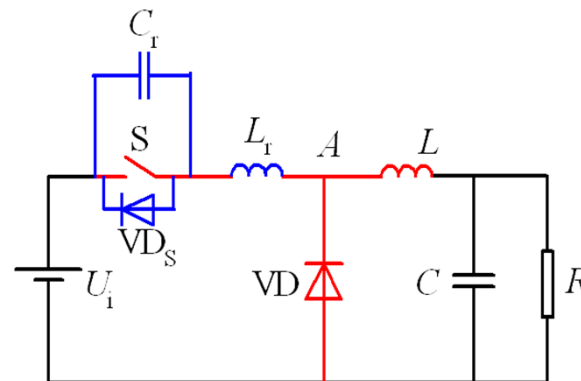
$$\frac{d u_{Cr}}{d t} = \frac{I_L}{C_r}$$



t_0 以前

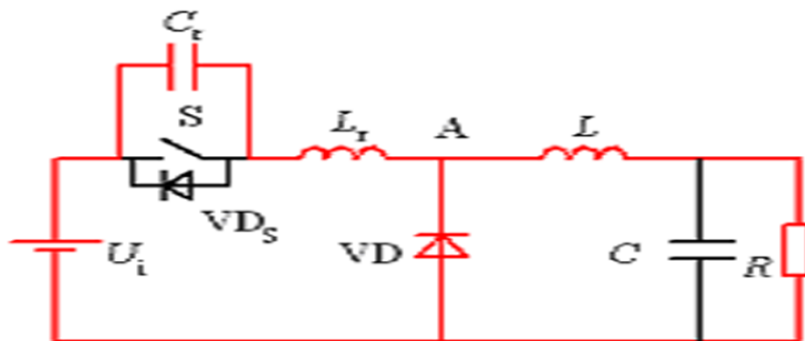


$t_0 \sim t_1$

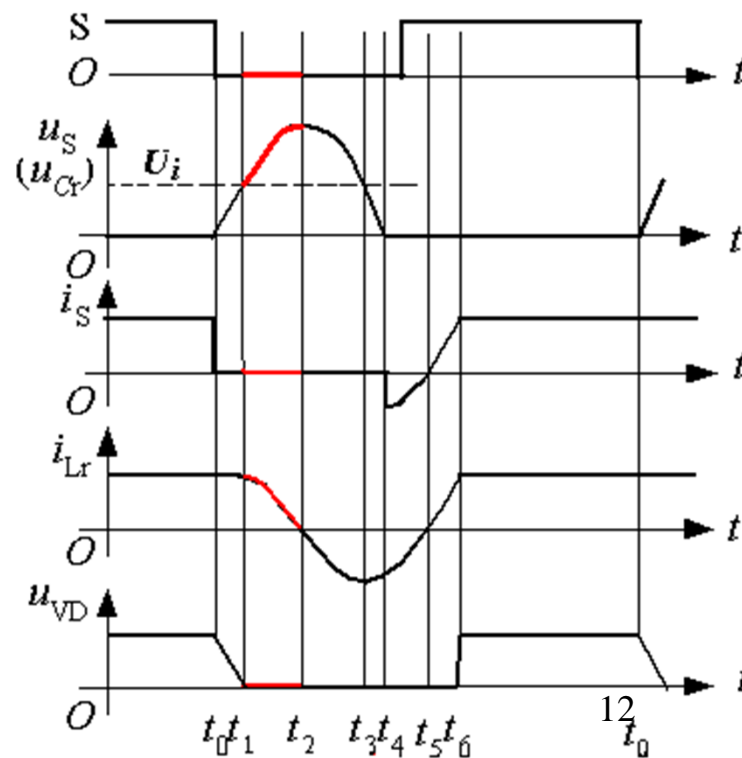
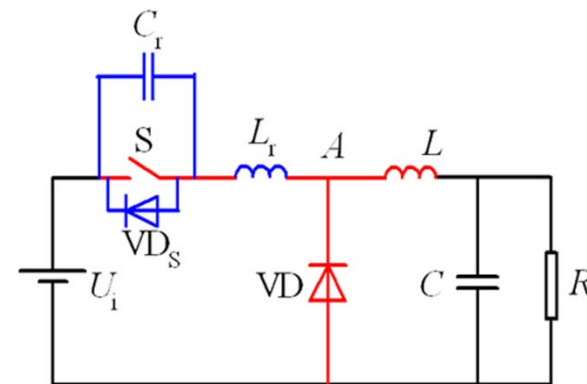
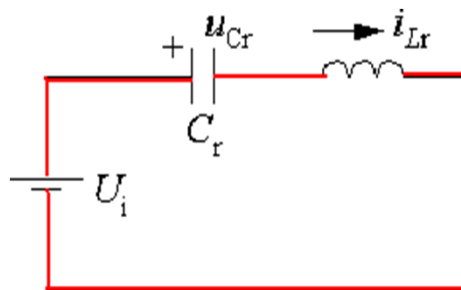


➤ t_1 到 t_4 时段：电路谐振阶段，如图电路。
回忆谐振过程L、C电流电压的变化过程

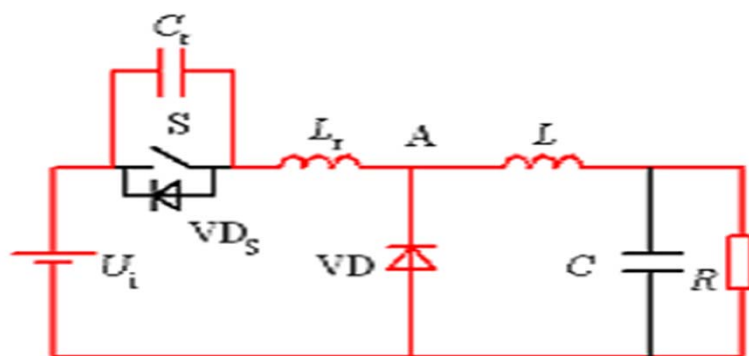
$t_1 \sim t_2$ 时段： t_1 时刻VD导通，L通过VD续流， C_r 、 L_r 、 U_i 形成谐振回路；谐振过程中， L_r 对 C_r 充电， u_{Cr} 不断上升， i_{Lr} 不断下降，直到 t_2 时刻， i_{Lr} 下降到零， u_{Cr} 达到谐振峰值。



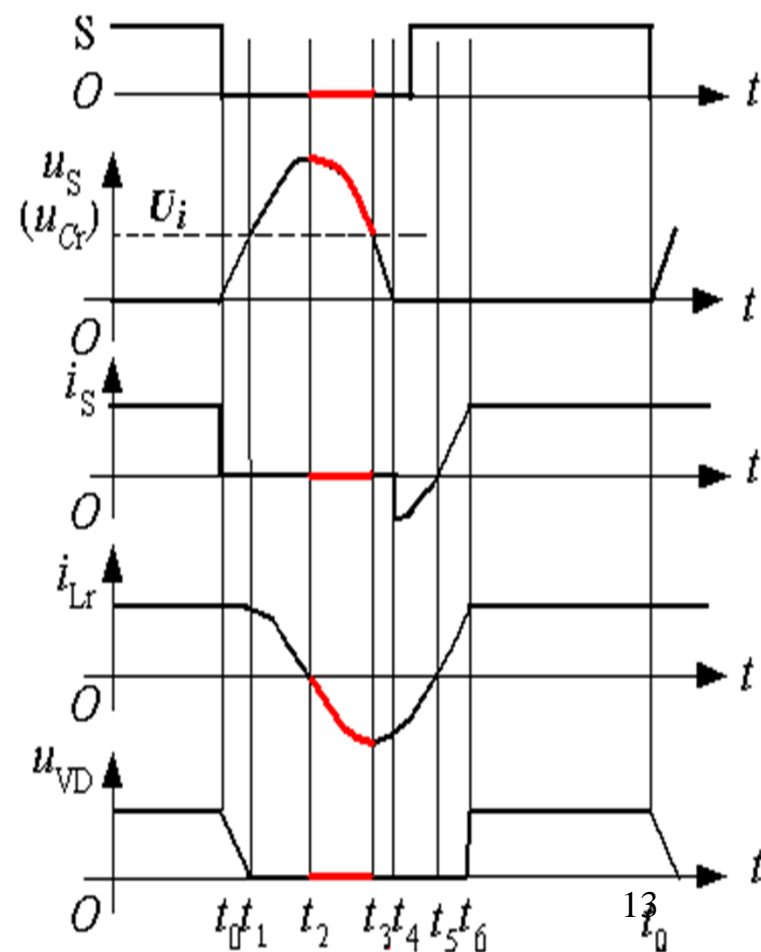
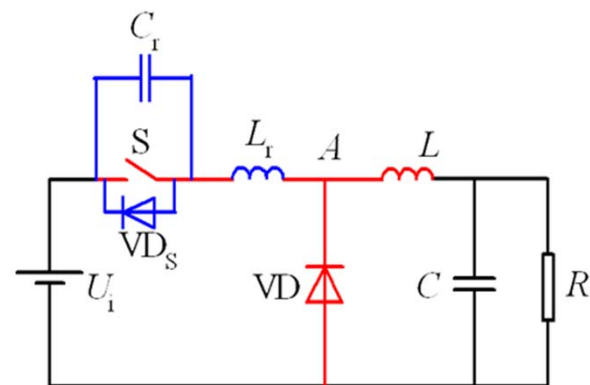
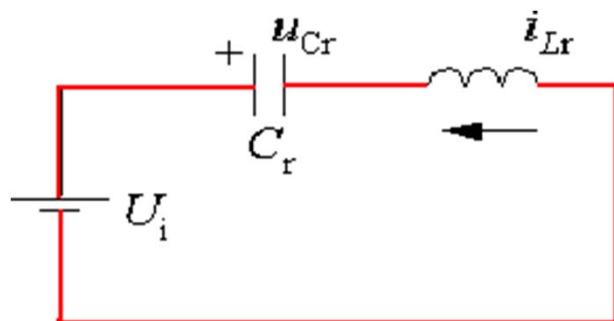
$t_1 \sim t_2$



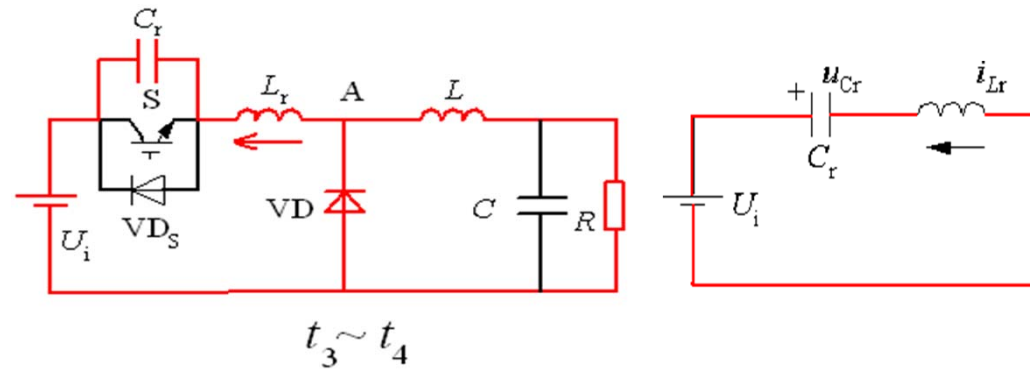
$t_2 \sim t_3$ 时段: t_2 时刻后, C_r 向 L_r 放电, i_{Lr} 改变方向, u_{Cr} 不断下降, 直到 t_3 时刻, $u_{Cr}=U_i$, 这时, $u_{Lr}=0$, i_{Lr} 达到反向谐振峰值。



$t_2 \sim t_3$



$t_3 \sim t_4$ 时段: t_3 时刻以后, L_r 向 C_r 反向充电, u_{Cr} 继续下降, 直到 t_4 时刻 $u_{Cr}=0$ 。谐振结束。

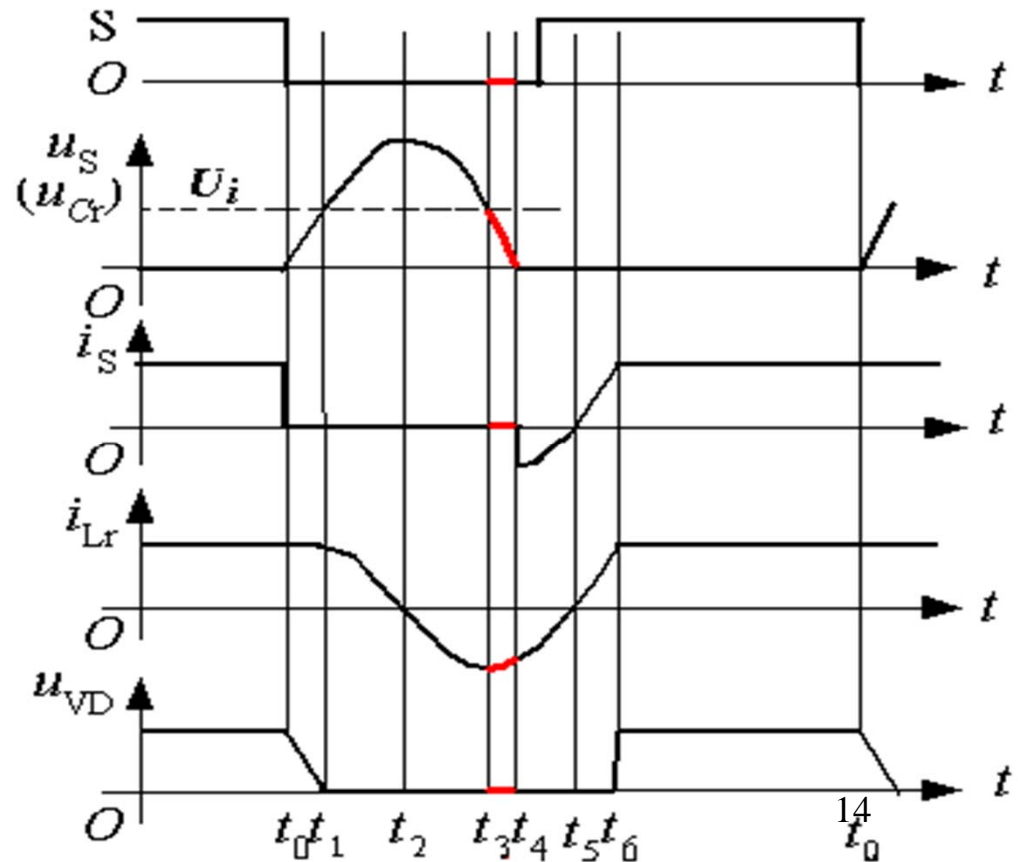


t_1 到 t_4 时段电路谐振过程的方程为

$$L_r \frac{di_{Lr}}{dt} + u_{Cr} = U_i$$

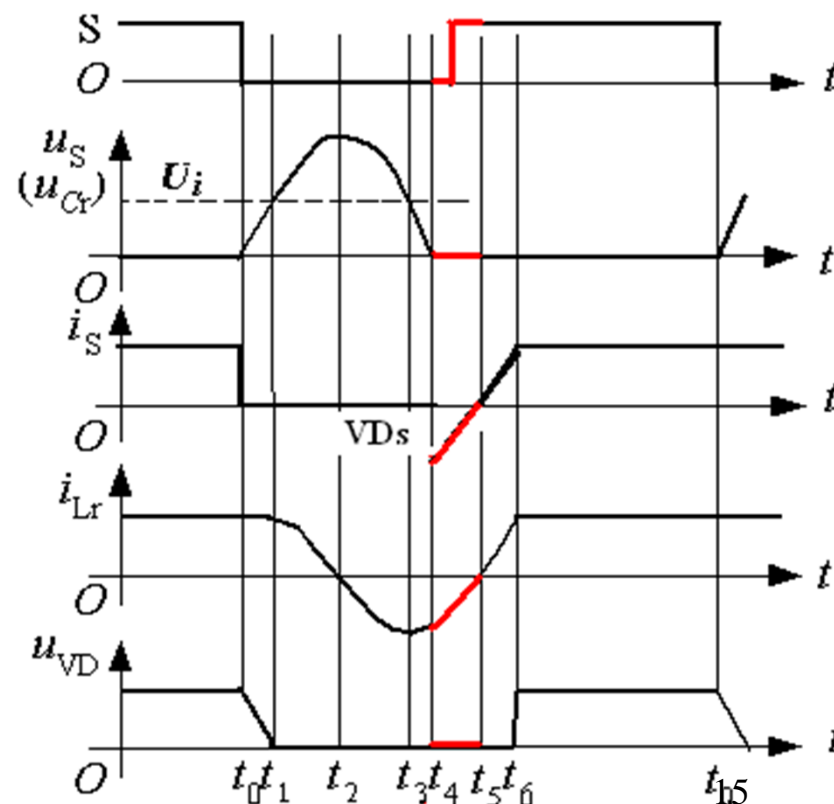
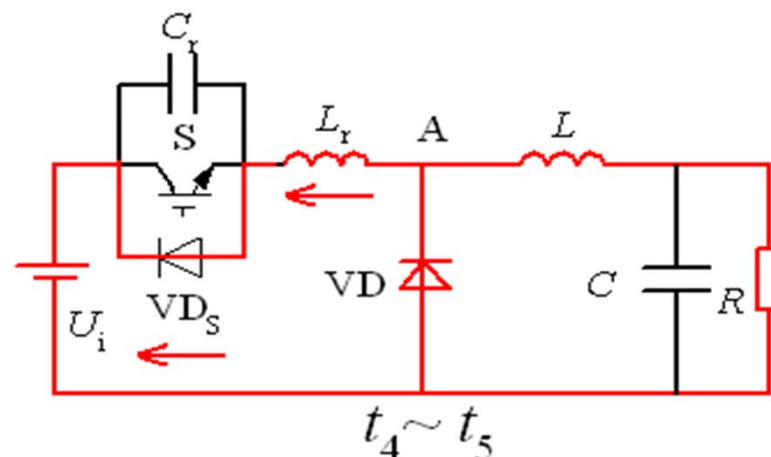
$$C_r \frac{du_{Cr}}{dt} = i_{Lr}$$

$$u_{Cr}|_{t=t_1} = U_i, \quad i_{Lr}|_{t=t_1} = I_L, \quad t \in [t_1, t_4]$$



➤ $t_4 \sim t_5$ 时段：谐振电容电压为0（电感电流线性衰减）阶段。如图电路。

电感 L_r 的电流方向不变，二极管 VD_s ，导通， u_{Cr} 被箝位于零， $u_{Lr}=U_i$ ， i_{Lr} 线性衰减，直到 t_5 时刻， $i_{Lr}=0$ 。由于这一时段S两端电压为零，所以必须在这一时段开通开关S，才不会产生开通损耗。实现软开关。



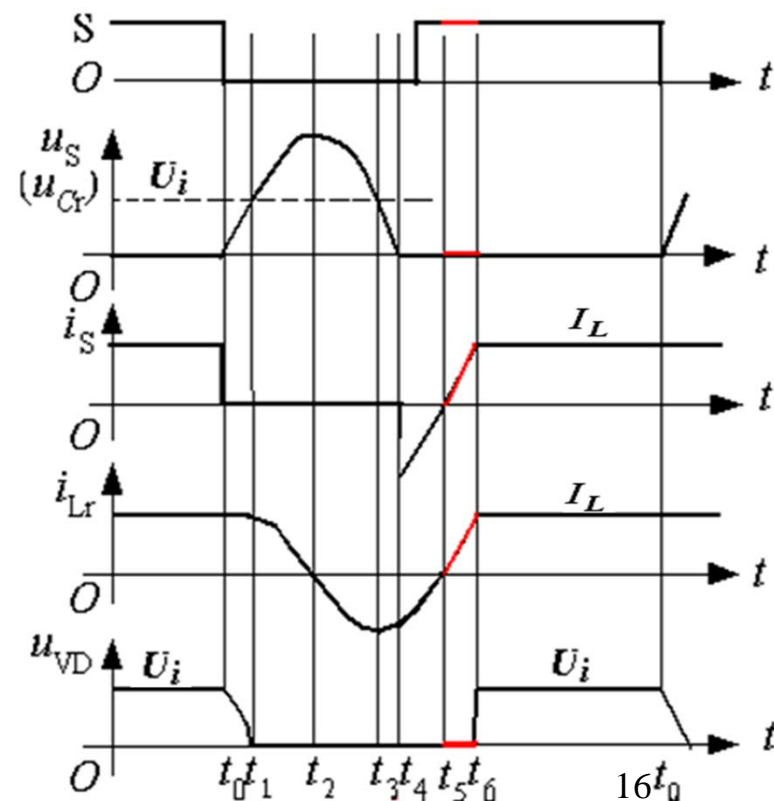
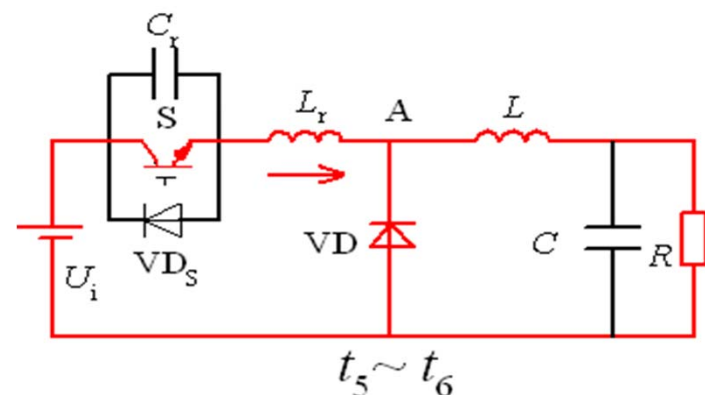
➤ $t_5 \sim t_6$ 时段：谐振电感电流线性上升阶段，如图电路。

S为通态， i_{Lr} 线性上升，直到 t_6 时刻， $i_{Lr}=I_L$ ，VD关断。

t_4 到 t_6 时段电流 i_{Lr} 的变化率为

$$\frac{di_{Lr}}{dt} = \frac{U_i}{L_r}$$

➤ $t_6 \sim t_0$ 时段：S为通态，VD为断态。
同前面 t_0 以前的工作模式。



◆ 谐振过程是软开关电路工作过程中最重要的部分，理论分析零电压开关准谐振电路 谐振过程中实现软开关的条件。

u_{Cr} （即开关S的电压 u_S ）的表达式

$$L_r \frac{di_{Lr}}{dt} + u_{Cr} = U_i$$

$$C_r \frac{du_{Cr}}{dt} = i_{Lr}$$

$$u_{Cr}|_{t=t_1} = U_i, i_{Lr} = I_L, t \in [t_1, t_4]$$

求解得：

$$u_{Cr}(t) = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} I_L \sin \omega_r (t - t_1) + U_i$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}, t \in [t_1, t_4]$$

$[t_1, t_4]$ 上的最大值即 u_{Cr} 的谐振峰值，即开关S承受的峰值电压，为

$$U_p = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} I_L + U_i$$

如果正弦项的幅值小于 U_i ， u_{Cr} 就不可能谐振到零，S也就不可能实现零电压开通。实现软开关的条件

$$\sqrt{\frac{L_r}{C_r}} I_L \geq U_i$$

◆ 零电压开关准谐振电路的缺点：谐振电压峰值将高于输入电压 U_i 的2倍，开关S的耐压必须相应提高，电路的成本增加，可靠性降低。