



# 电力电子技术

**教师名称** 肖嵩

xiaosong@home.swjtu.edu.cn

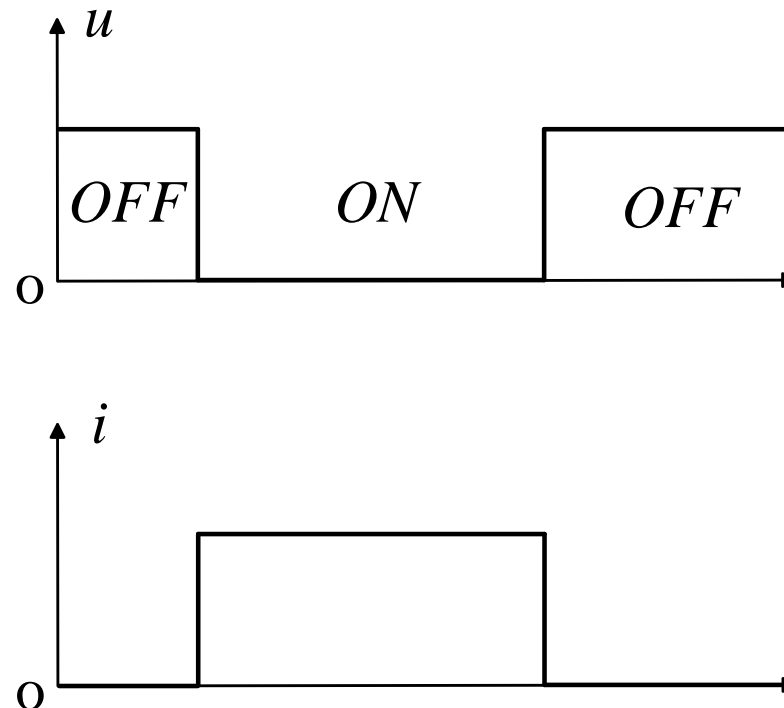
西南交通大学 电气工程学院

- 引言
- 8.1 软开关的基本概念
- 8.2 软开关电路的分类
- 8.3 典型的软开关电路
- 8.4 本章小结

- 电力电子装置的发展趋势
  - 小型化、轻量化；高效率和电磁兼容性
- 实现途径
  - 电力电子装置高频化
- 优点与存在的问题
  - 滤波器、变压器体积和重量减小
  - 开关损耗增加
  - 电磁干扰增大
- 解决办法——软开关技术
  - 降低开关损耗和开关噪声
  - 进一步提高开关频率

## ■ 理想开关

- 开关状态的转换在**瞬间**完成;
- 忽略开关过程对电路的影响。



# 8.1 软开关的基本概念



西南交通大学  
Southwest Jiaotong University

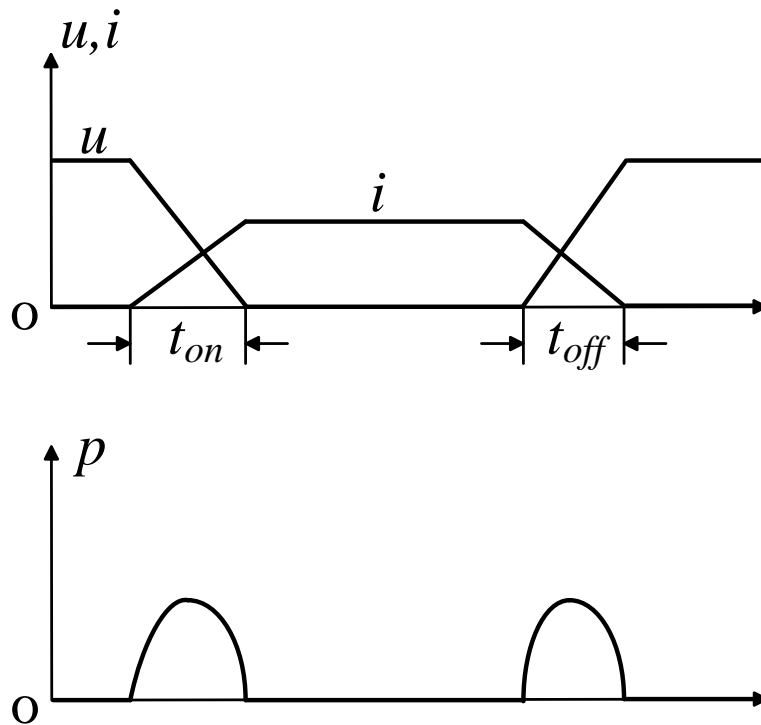
- 8.1.1 硬开关与软开关
- 8.1.2 零电压开关与零电流开关

## 8.1.1 硬开关



### ■ 硬开关

- 开关过程中电压、电流均不为零，出现了重叠，有显著的**开关损耗**。
- 开关过程伴随着电压和电流的剧烈变化，波形出现了明显的过冲，产生了开关噪声。

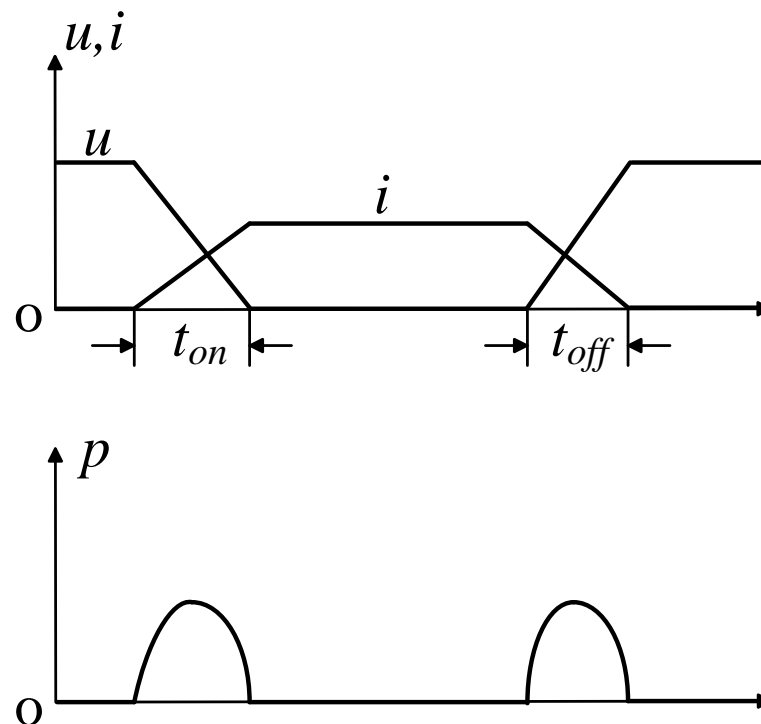


## 8.1.1 硬开关



### ■ 硬开关

- 开关损耗随着开关频率的提高而增加。
- 开关噪声给电路带来严重的电磁干扰。

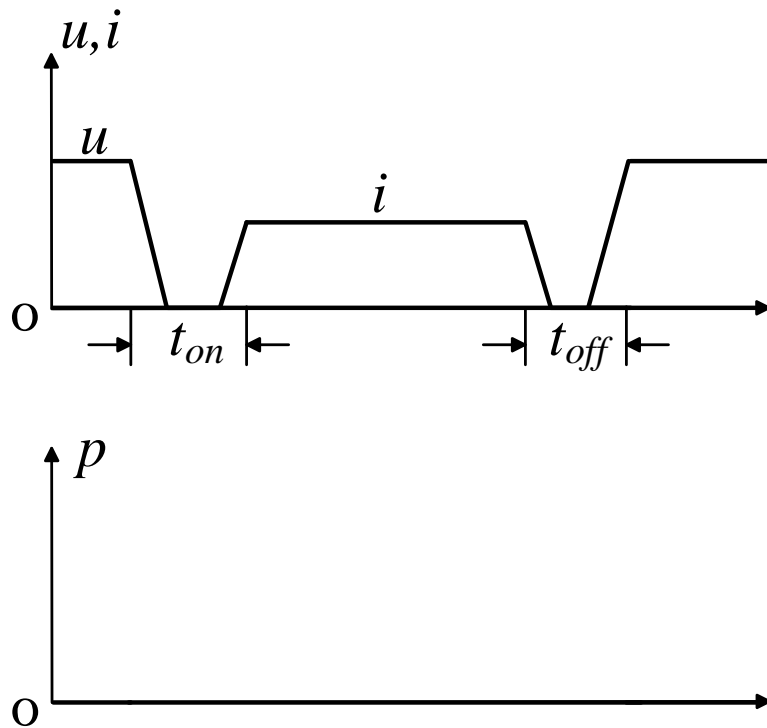


## 8.1.1 软开关



### ■ 软开关

- 在电路中增加了小电感、电容等谐振元件，在开关过程前后引入谐振，使开关条件得以改善；
- 降低开关损耗和开关噪声；
- 软开关有时也被称为谐振开关。



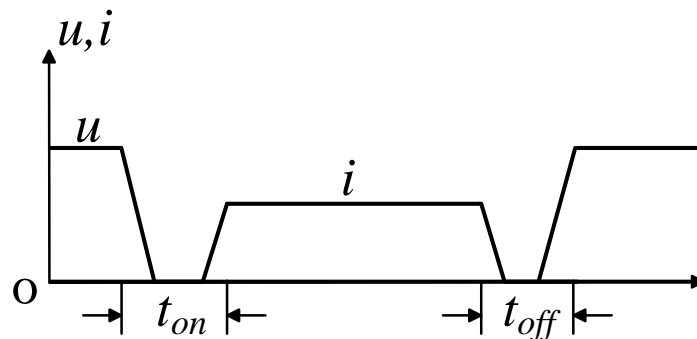


## 8.1.2 零电压开关与零电流开关



### ■ 软开关分类

- 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——简称零电压开关。
- 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——简称零电流开关。
- 零电压开通和零电流关断要靠电路中的谐振来实现。



## 8.1.2 零电压开关与零电流开关



- 零电压关断：与开关**并联的电容**能使开关关断后电压上升延缓，从而降低关断损耗，有时称这种关断过程为零电压关断。
- 零电流开通：与开关相**串联的电感**能使开关开通后电流上升延缓，降低了开通损耗，有时称之为零电流开通。
- 简单的利用并联电容实现零电压关断和利用串联电感实现零电流开通一般会给电路造成总损耗增加、关断过电压增大等负面影响，因此是得不偿失的，常与零电压开通和零电流关断配合使用。

## 8.2 软开关电路的分类



西南交通大学  
Southwest Jiaotong University

- 8.2.1 准谐振电路
- 8.2.2 零开关PWM电路
- 8.2.3 零转换PWM电路

## 8.2 软开关电路的分类

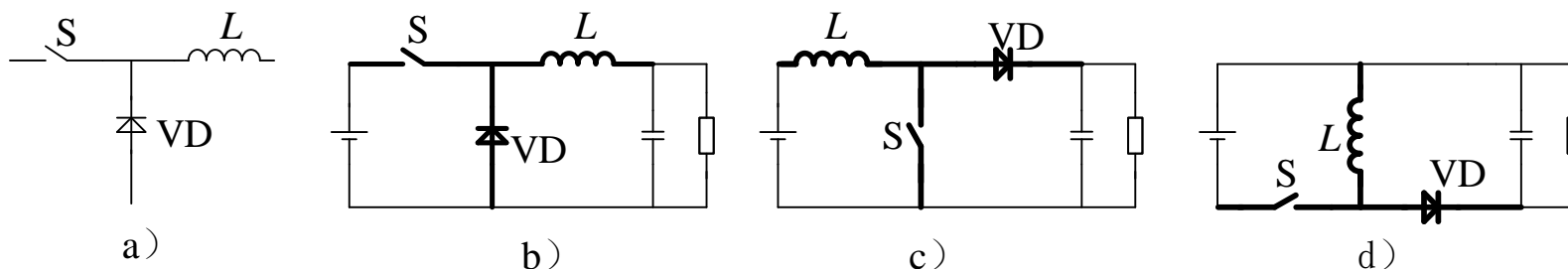


- 根据电路中主要开关元件开通和关断时电压电流状态，分为**零电压电路**（零电压开通）和**零电流电路**（零电流关断）两大类。
- 根据软开关技术发展的历程可以将软开关电路分成：
  - **准谐振电路**
  - **零开关PWM电路**
  - **零转换PWM电路**

## 8.2 软开关电路的分类



- 每一种软开关电路都可以用于降压型、升压型等不同电路，可以从基本开关单元导出具体电路。

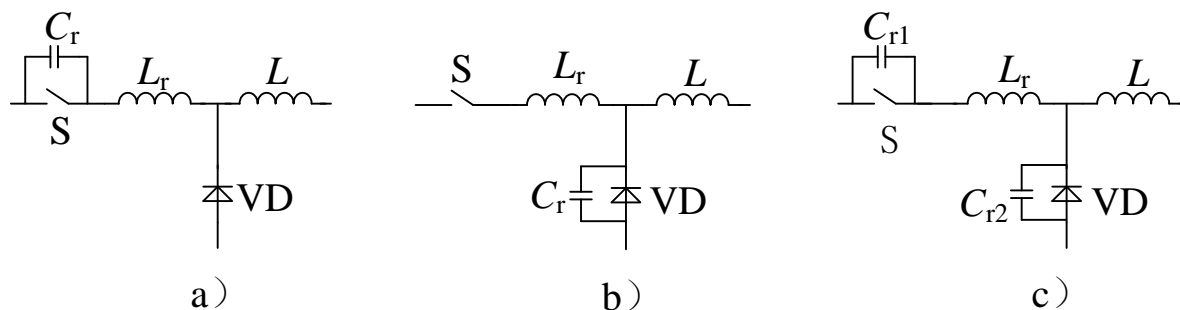


- (a) 基本开关单元
- (b) 降压斩波器中的基本开关单元
- (c) 升压斩波器中的基本开关单元
- (d) 升降压斩波器中的基本开关单元

## 8.2.1 准谐振电路



- 零电压开关准谐振电路 (ZVS QRC)
- 零电流开关准谐振电路 (ZCS QRC)
- 零电压开关多谐振电路 (ZVS MRC)
- 用于逆变器的谐振直流环节 (Resonant DC Link)



- (a) 零电压开关准谐振电路的基本开关单元
- (b) 零电流开关准谐振电路的基本开关单元
- (c) 零电压开关多谐振电路的基本开关单元

## 8.2.1 准谐振电路



- 准谐振电路为最早出现的软开关电路。
- 准谐振电路中电压或电流的波形为**正弦半波**，因此称之为**准谐振**。
- 谐振的引入使开关损耗和开关噪声大大下降。

### ■ 存在问题：

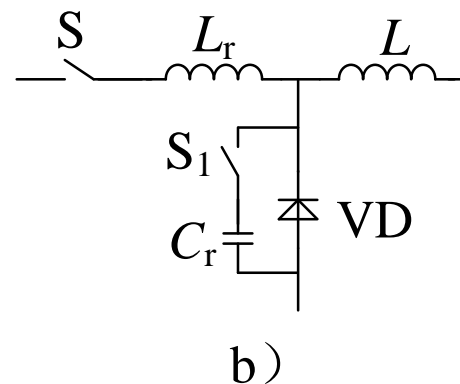
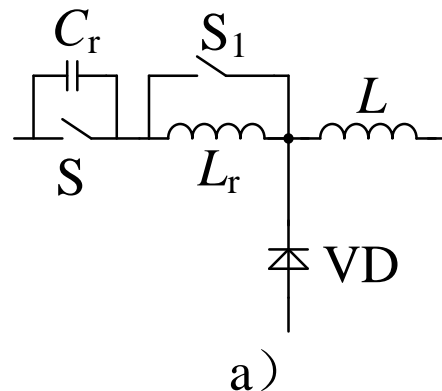
- 谐振电压峰值很高，要求器件耐压必须提高；
- 谐振电流有效值很大，电路中存在大量无功功率的交换，电路导通损耗加大；
- 谐振周期随输入电压、负载变化而改变，因此电路只能采用脉冲频率调制（PFM）方式来控制。



## 8.2.2 零开关PWM电路



- 引入**辅助开关**控制谐振的开始时刻，使谐振仅发生于开关过程前后。
- 零开关PWM电路分为：
  - 零电压开关PWM电路：ZVS PWM
  - 零电流开关PWM电路：ZCS PWM

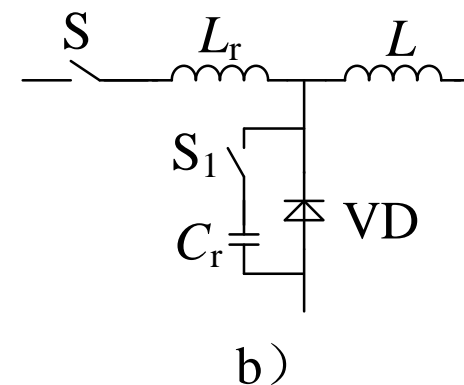
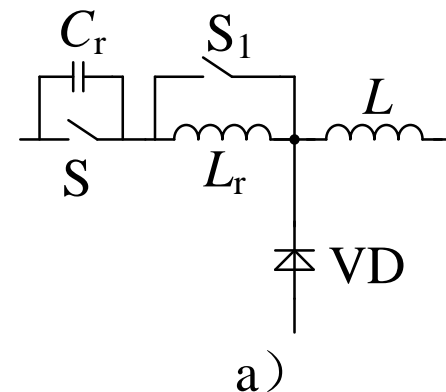


## 8.2.2 零开关PWM电路



### ■ 特点

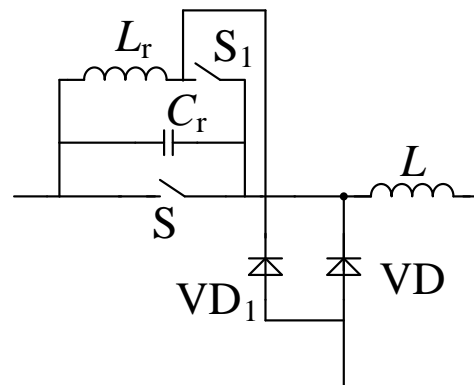
- 电压和电流基本上是方波，只是上升沿和下降沿较缓，开关承受的电压明显降低；
- 电路可以采用开关频率固定的PWM控制方式。



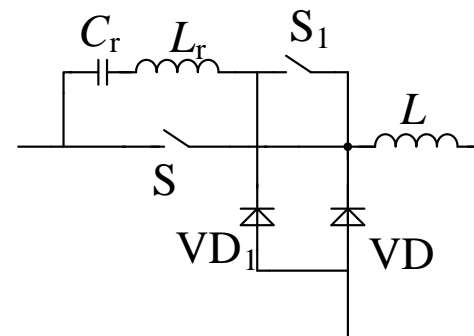
## 8.2.3 零转换PWM电路



- 采用**辅助开关**控制谐振的开始时刻，但谐振电路是与主开关**并联**的。
- 零转换PWM电路分为：
  - 零电压转换PWM电路：ZVT PWM
  - 零电流转换PWM电路：ZCT PWM



a)



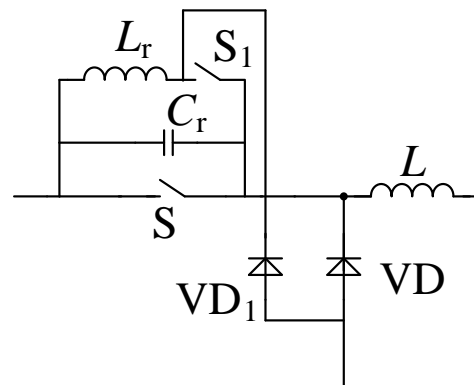
b)

## 8.2.3 零转换PWM电路

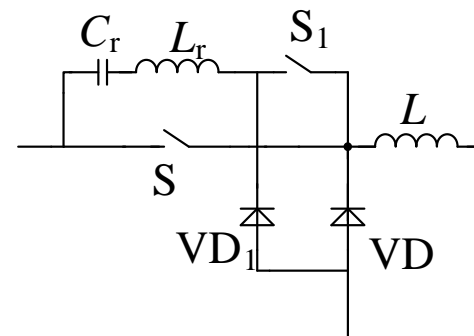


### ■ 特点

- 谐振电路与主开关并联。
- 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，使得电路效率进一步提高。



a)



b)

## 8.3 典型的软开关电路



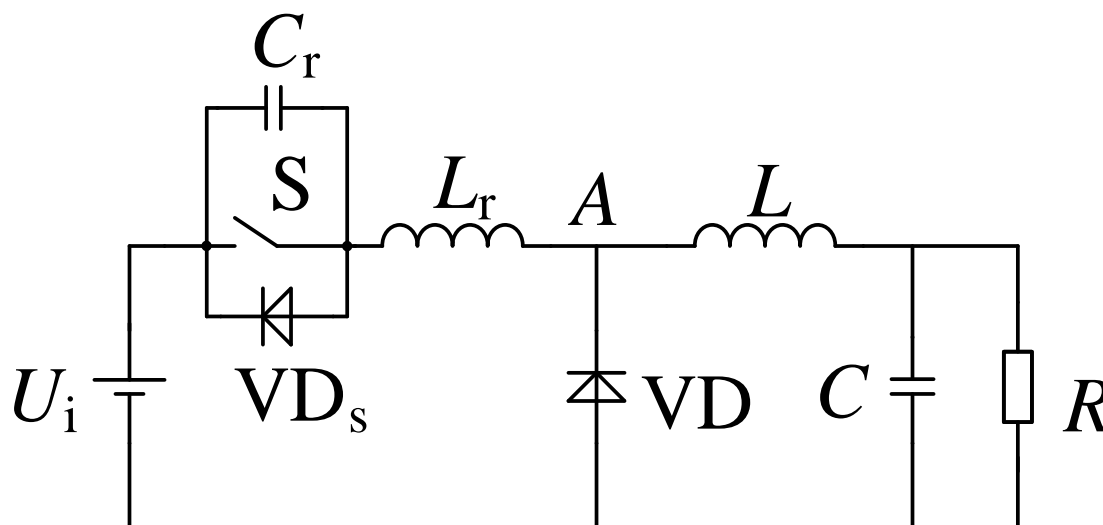
西南交通大学  
Southwest Jiaotong University

- 8.3.1 零电压开关准谐振电路
- 8.3.2 移相全桥零电压开关PWM电路
- 8.3.3 谐振直流环
- 8.3.4 零电压转换PWM电路

## 8.3.1 零电压开关准谐振电路



- 结构简单，仍在应用；
- 假设 $L$ 和 $C$ 很大，可以等效为电流源和电压源；
- 选择 $S$ 的关断时刻为分析的起点。

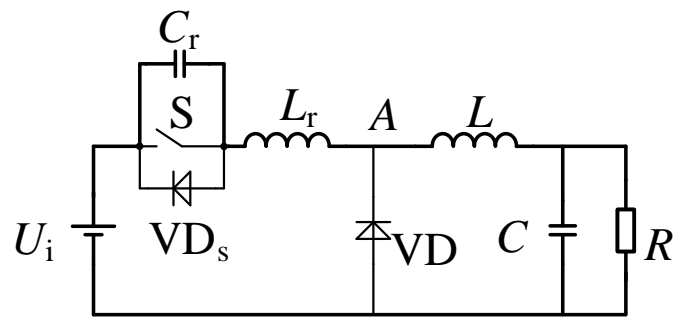
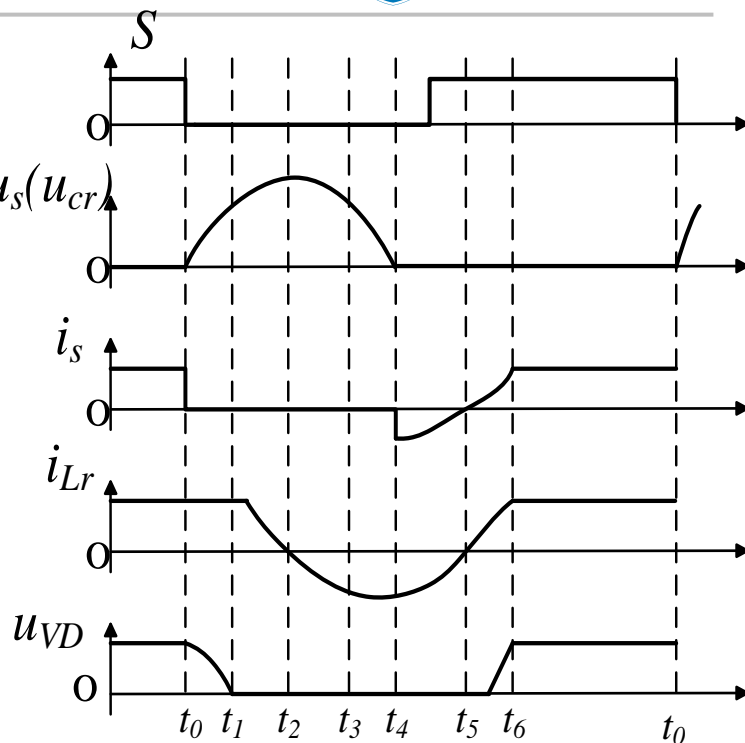


## 8.3.1 零电压开关准谐振电路



$t_0 \sim t_1$  时段:  $t_0$  时刻之前, 开关  $S$  为通态, 二极管  $VD$  为断态,  $u_{Cr}=0$ ,  $i_{Lr}=I_L$ 。  $t_0$  时刻  $S$  关断, 与其并联的电容  $C_r$  使  $S$  关断后电压上升减缓, 因此  $S$  的关断损耗减小。  $S$  关断后,  $VD$  尚未导通, 电感  $L_r+L$  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:

$$\frac{du_{Cx}}{dt} = \frac{I_L}{C_r}$$



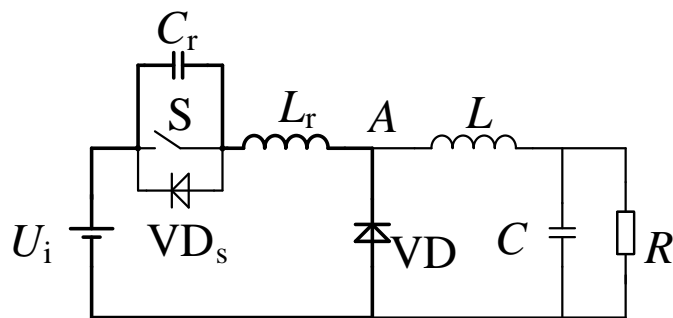
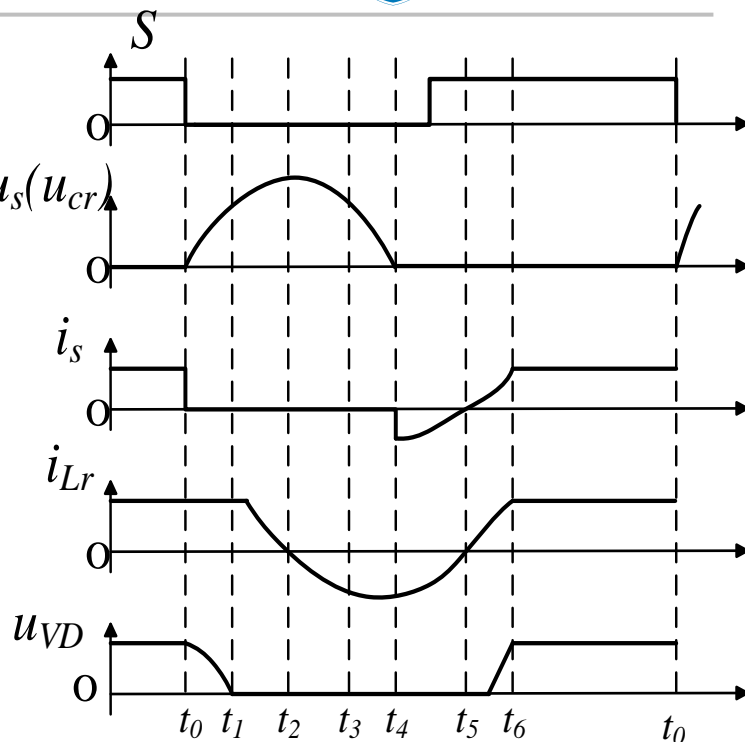
## 8.3.1 零电压开关准谐振电路



$t_1 \sim t_2$ 时段:  $t_1$ 时刻二极管VD导通, 电感 $L$ 通过VD续流,  $C_r$ 、 $L_r$ 、 $U_i$ 形成谐振回路。  $t_2$ 时刻,  $i_{Lr}$ 下降到零,  $u_{Cr}$ 达到谐振峰值。

$t_2 \sim t_3$ 时段:  $t_2$ 时刻后,  $C_r$ 向 $L_r$ 放电, 直到 $t_3$ 时刻,  $u_{Cr}=U_i$ ,  $i_{Lr}$ 达到反向谐振峰值。

$t_3 \sim t_4$ 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  $u_{Cr}=0$ 。





## 8.3.1 零电压开关准谐振电路

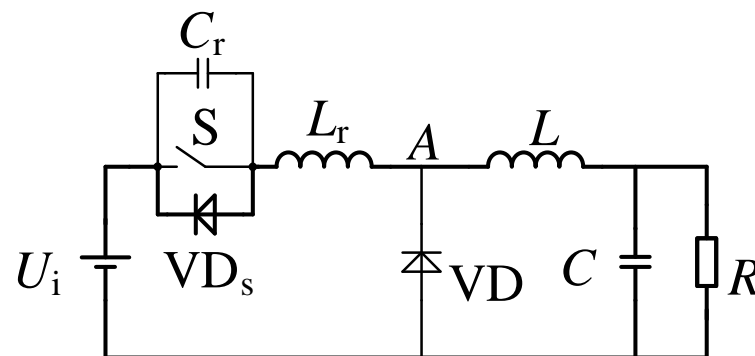
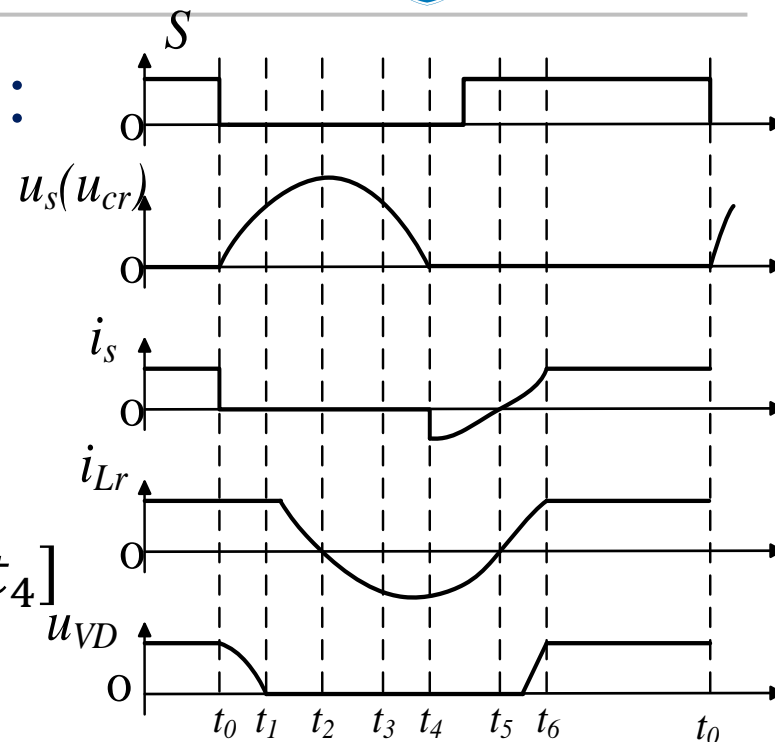


$t_1$ 到 $t_4$ 时段电路谐振过程方程：

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

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

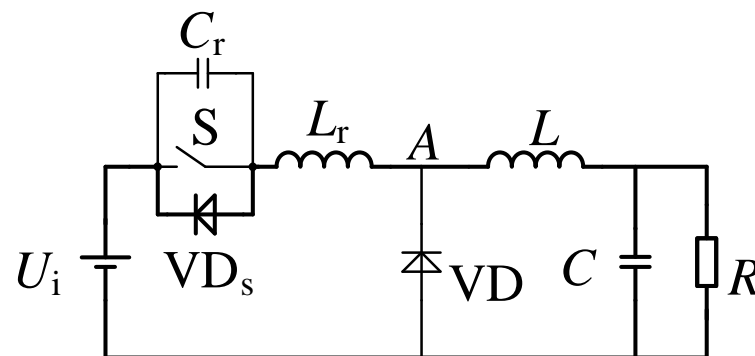
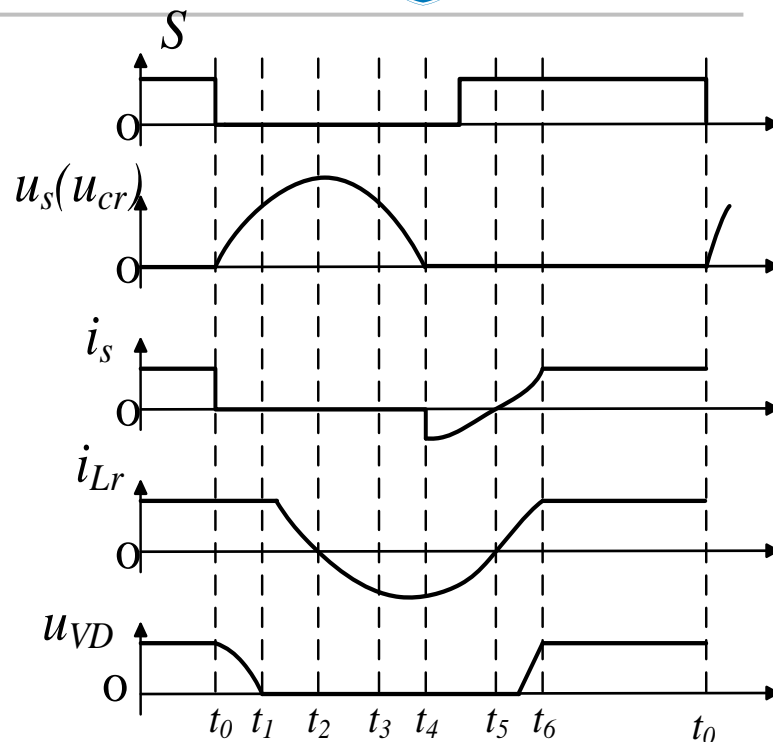
$$u_{Cr}|_{t=t_1} = U_i, i_{Lr}|_{t=t_1} = I_L, t \in [t_1, t_4]$$



## 8.3.1 零电压开关准谐振电路



$t_4 \sim t_5$ 时段:  $VD_S$ 导通,  $u_{Cr}$ 被箝位于零,  $i_{Lr}$ 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使开关S开通, 才不会产生开通损耗。



## 8.3.1 零电压开关准谐振电路

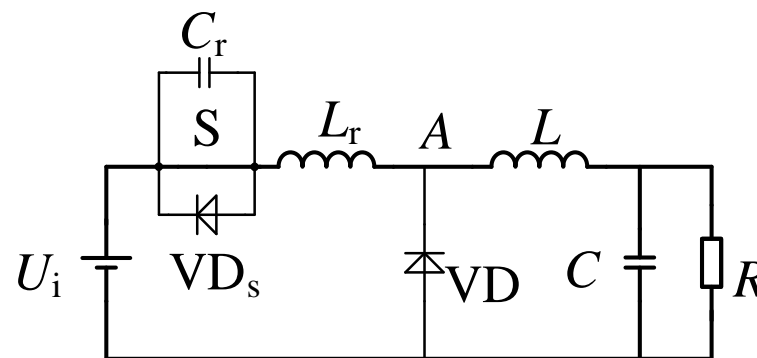
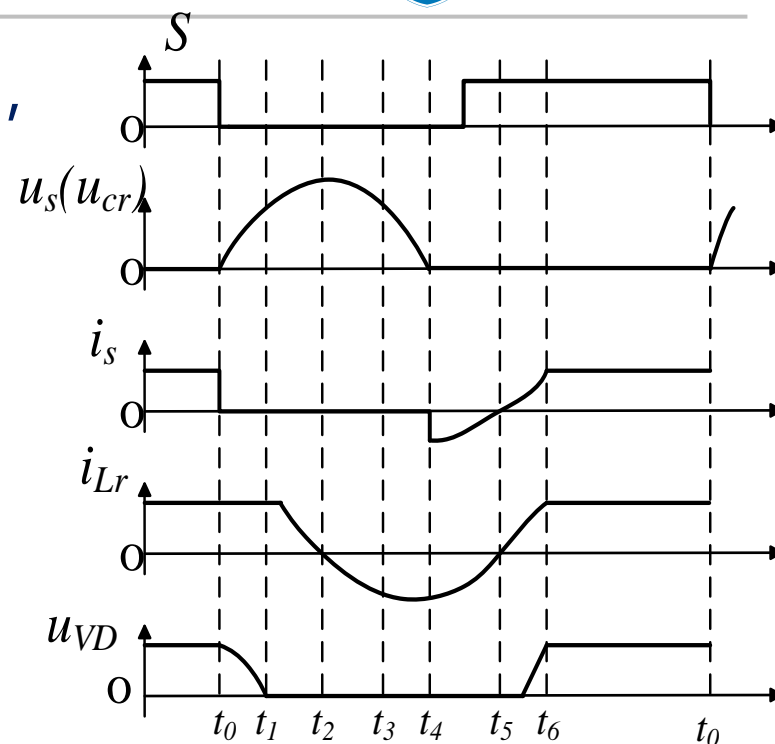


$t_5 \sim t_6$ 时段：S为通态， $i_{Lr}$ 线性上升，直到 $t_6$ 时刻， $i_{Lr} = I_L$ ，VD关断。

$t_4$ 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。



## 8.3.1 零电压开关准谐振电路



- 求解，可得 $u_{Cr}$ （即开关S的电压 $u_S$ ）的表达式：

$$U_{Cr}(t) = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} I_L \sin w_r(t - t_1) + U_i, \quad w_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}, \quad t \in [t_1, t_4]$$

- $u_{Cr}$ 的谐振峰值表达式（即开关S承受的峰值电压）：

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

- 零电压开关准谐振电路实现软开关的条件：

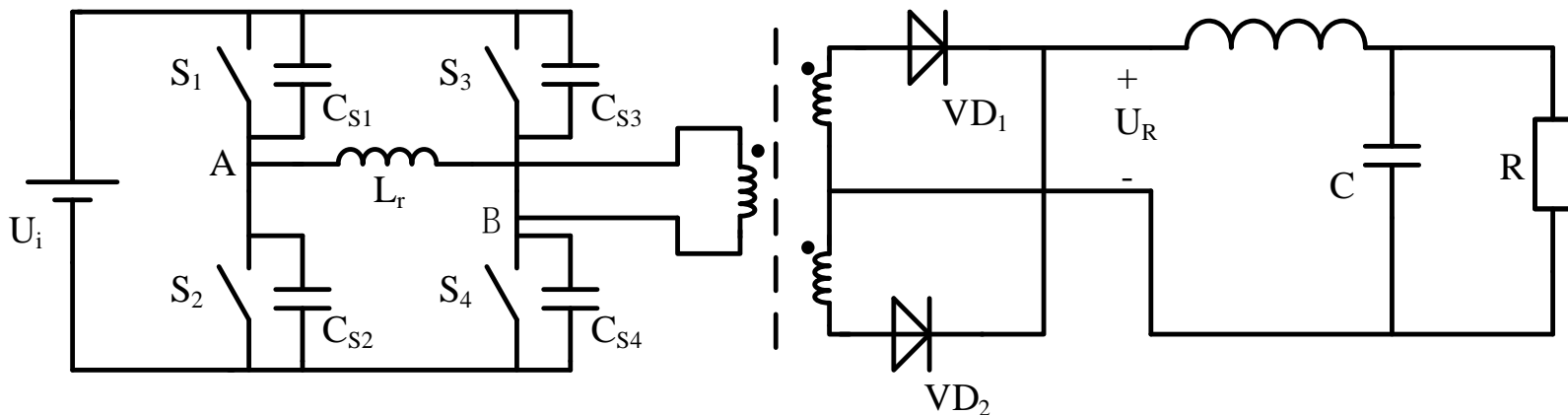
$$\sqrt{\frac{L_r}{C_r}} I_L \geq U_i$$

- 缺点：谐振电压峰值将高于输入电压 $U_i$ 的2倍，增加了对开关器件耐压的要求。

## 8.3.2 移相全桥型零电压开关PWM电路



- 同硬开关全桥电路相比，仅增加了一个谐振电感，就使四个开关均为零电压开通。

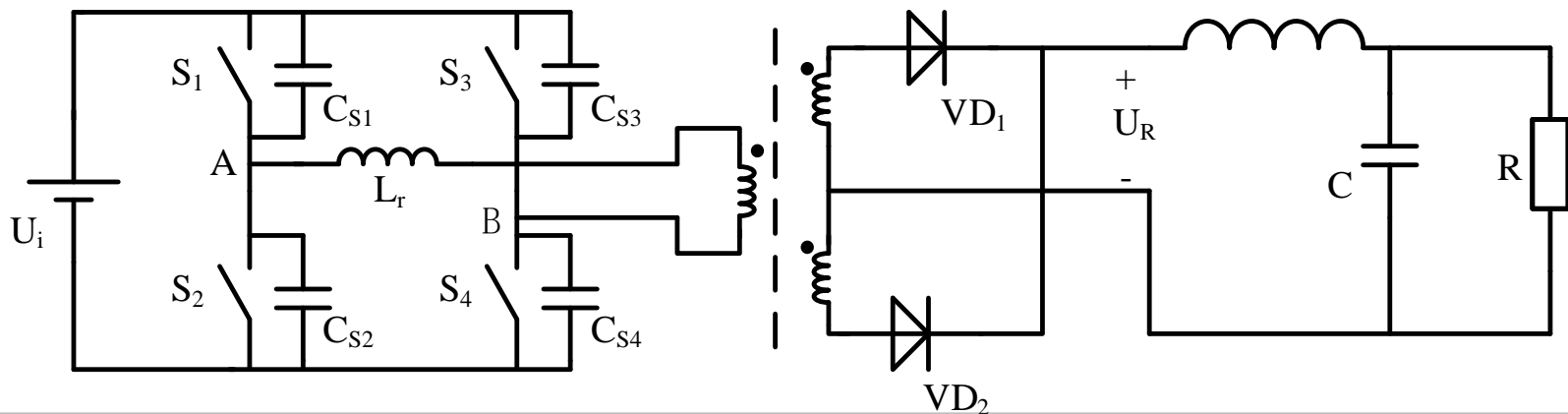


## 8.3.2 移相全桥型零电压开关PWM电路



### ■ 移相全桥电路控制方式的特点：

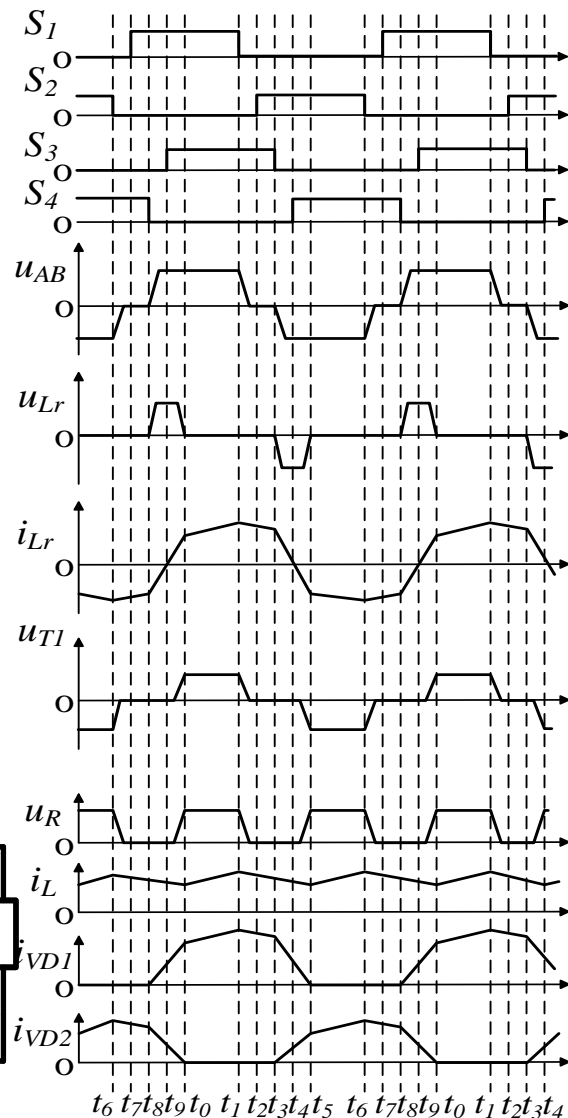
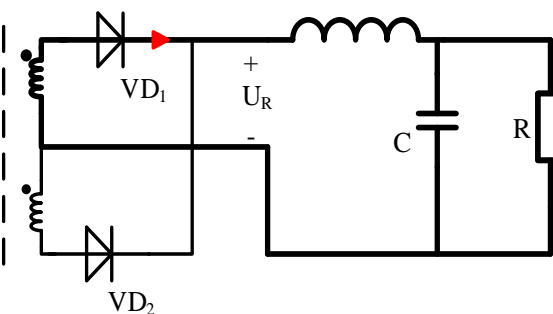
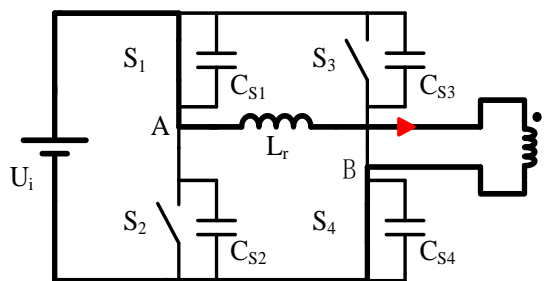
- 在开关周期 $T_s$ 内，每个开关导通时间都略小于 $T_s/2$ ，而关断时间都略大于 $T_s/2$ ；
- 同一半桥中两个开关不同时处于通态，每个开关关断到另一个开关开通都要经过一定的死区时间。
- 互为对角的两对开关 $S_1$ - $S_4$ 和 $S_2$ - $S_3$ ， $S_1$ 的波形比 $S_4$ 超前 $0\sim T_s/2$ 时间，而 $S_2$ 的波形比 $S_3$ 超前 $0\sim T_s/2$ 时间，因此称 $S_1$ 和 $S_2$ 为超前的桥臂，而称 $S_3$ 和 $S_4$ 为滞后的桥臂。



## 8.3.2 移相全桥型零电压开关PWM电路



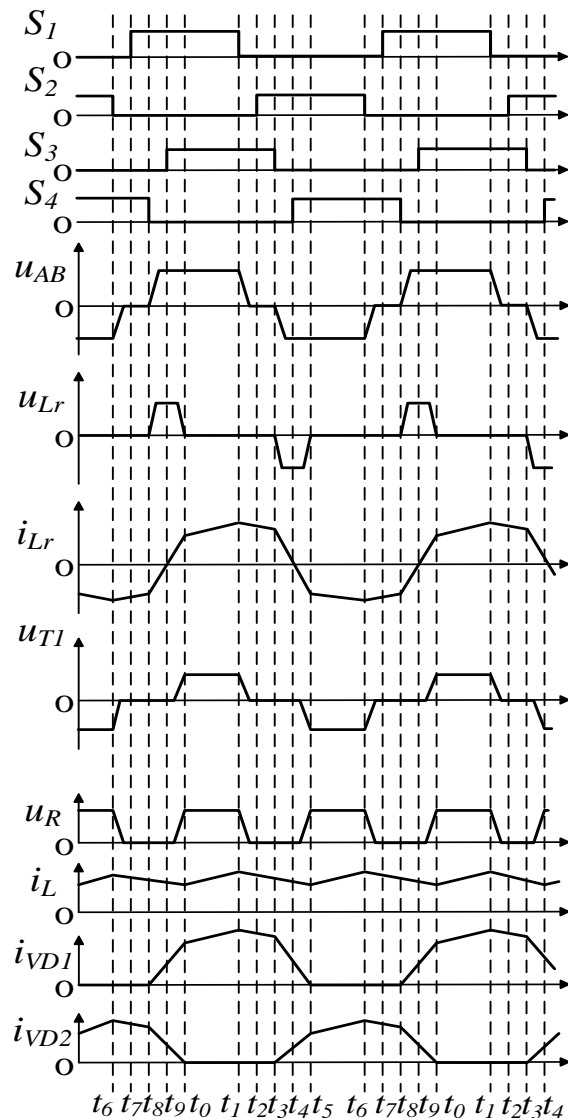
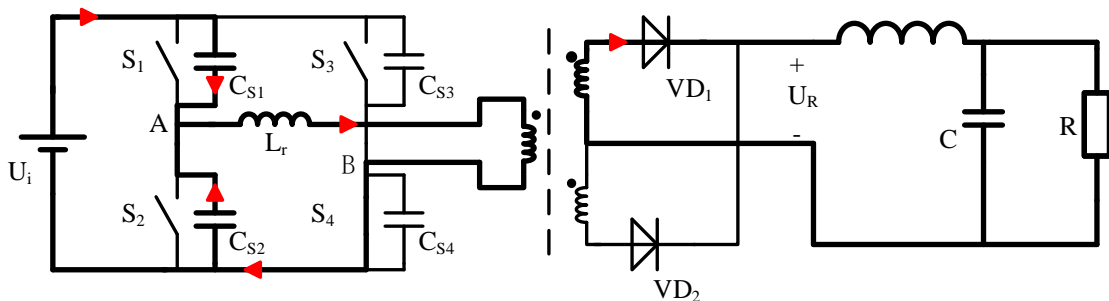
- $t_0 \sim t_1$ 时段:  $S_1$ 与 $S_4$ 导通, 直到 $t_1$ 时刻 $S_1$ 关断。



## 8.3.2 移相全桥型零电压开关PWM电路



- $t_1 \sim t_2$ 时段:  $t_1$ 时刻开关 $S_1$ 关断后, 电容 $C_{s1}$ 、 $C_{s2}$ 与电感 $L_r$ 、 $L$ 构成谐振回路。 $C_{s1}$ 充电,  $C_{s2}$ 放电,  $u_A$ 不断下降, 直到 $u_A=0$ ,  $VD_{S2}$ 导通, 电流 $i_{Lr}$ 通过 $VD_{S2}$ 续流。

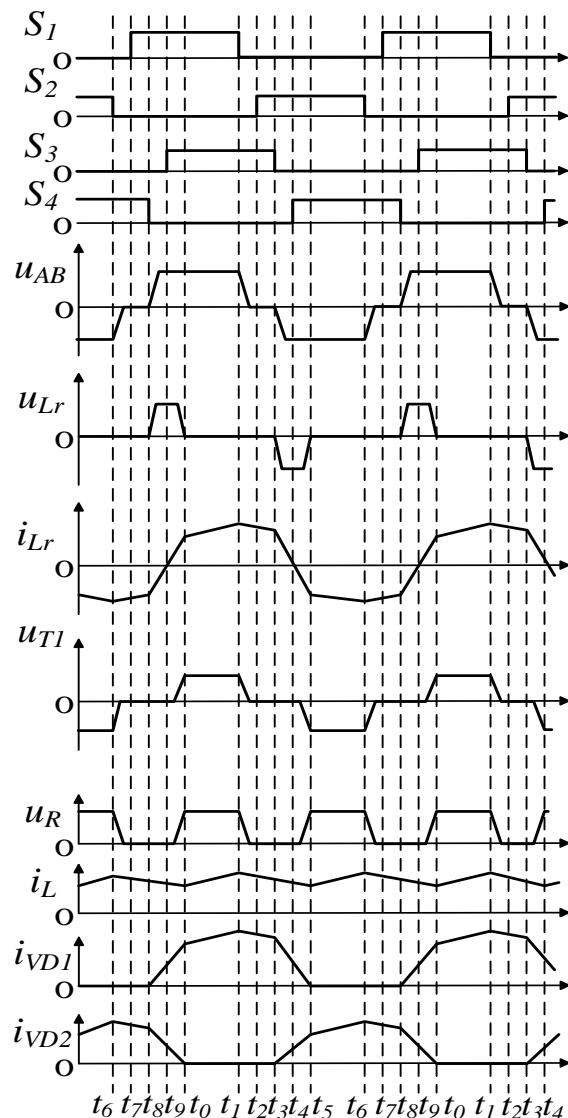
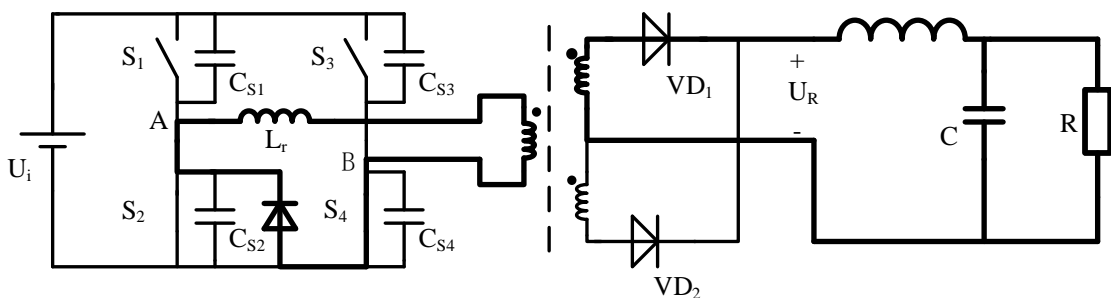




## 8.3.2 移相全桥型零电压开关PWM电路



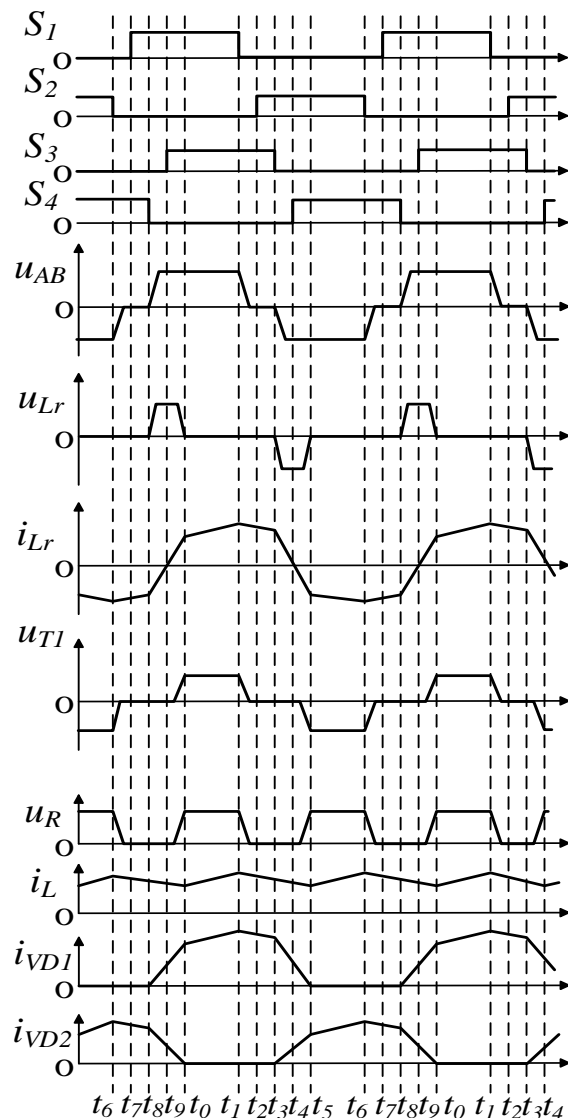
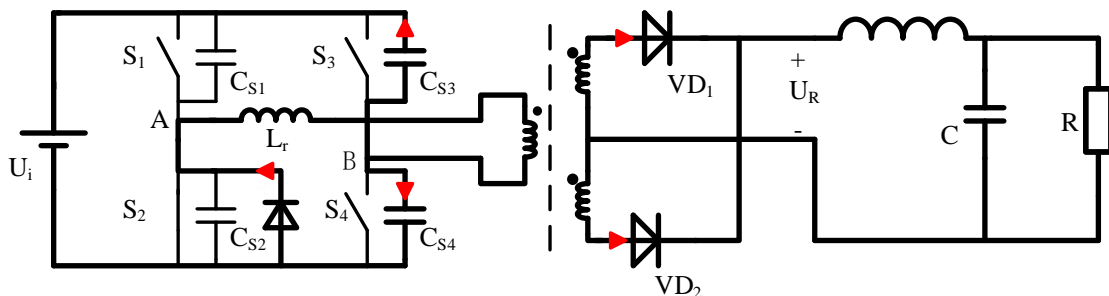
- $t_2 \sim t_3$ 时段:  $t_2$ 时刻开关 $S_2$ 开通, 由于此时其反并联二极管 $VD_{S2}$ 正处于导通状态, 因此 $S_2$ 为零电压开通。虽然 $S_2$ 开通, 但 $S_2$ 没有电流流过, 原边电流仍由 $VD_{S2}$ 流通。



## 8.3.2 移相全桥型零电压开关PWM电路



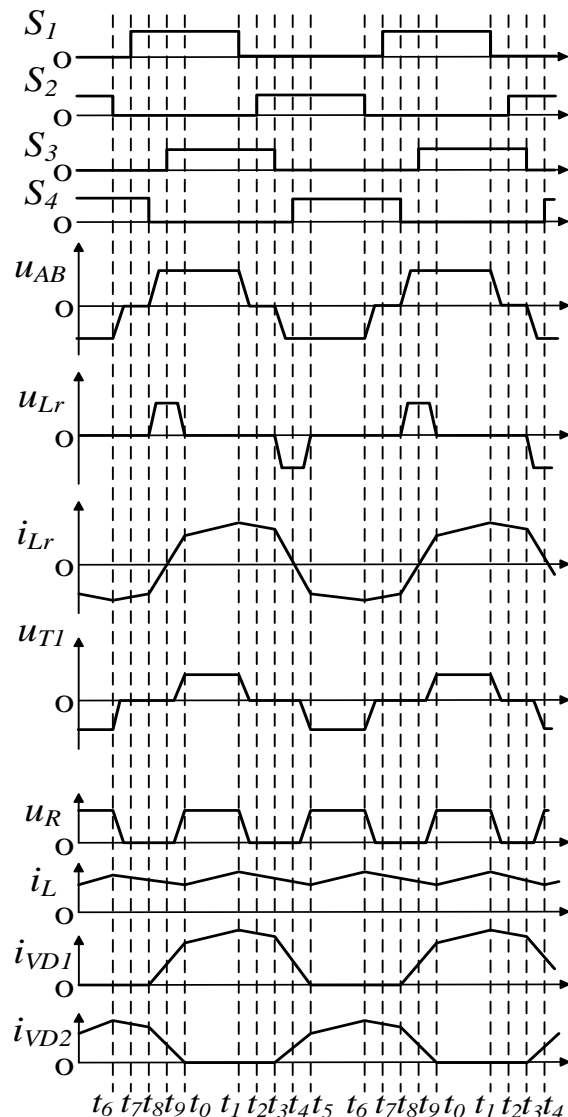
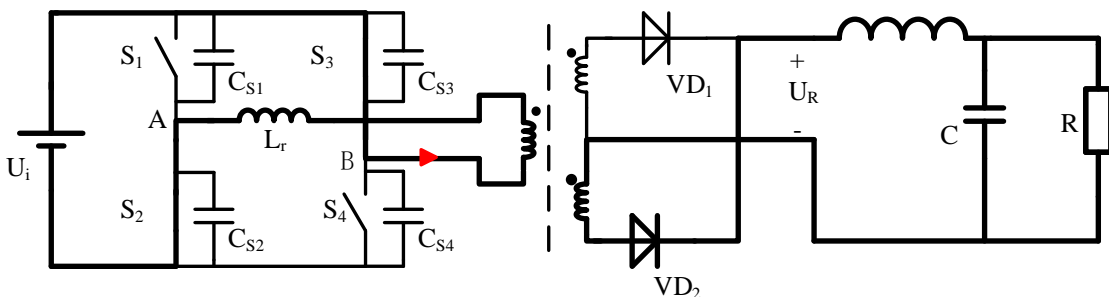
- $t_3 \sim t_4$ 时段:  $t_4$ 时刻开关 $S_4$ 关断后, 变压器二次侧 $VD_1$ 和 $VD_2$ 同时导通, 变压器一次侧和二次侧电压均为零, 相当于短路, 因此 $C_{s3}$ 、 $C_{s4}$ 与 $L_r$ 构成谐振回路。 $L_r$ 的电流不断减小, B点电压不断上升, 直到 $S_3$ 的反并联二极管 $VD_{S3}$ 导通。这种状态维持到 $t_4$ 时刻 $S_3$ 开通。因此 $S_3$ 为零电压开通。



## 8.3.2 移相全桥型零电压开关PWM电路



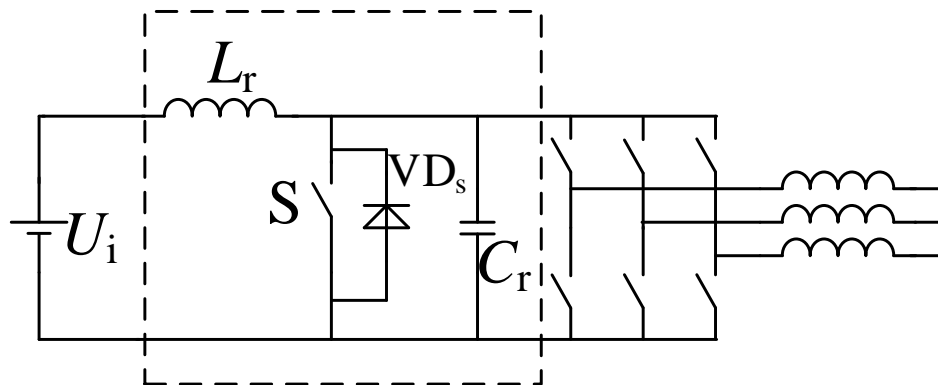
- $t_4 \sim t_5$ 时段:  $S_3$ 开通后,  $L_r$ 的电流继续减小。 $i_{Lr}$ 下降到零后反向增大,  $t_5$ 时刻  $i_{Lr} = I_L/k_T$ , 变压器二次侧 $VD_1$ 的电流下降到零而关断, 电流 $I_L$ 全部转移到 $VD_2$ 中。



### 8.3.3 谐振直流环



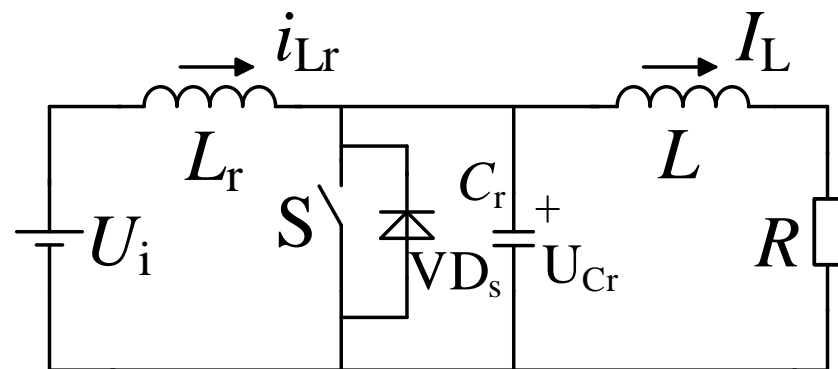
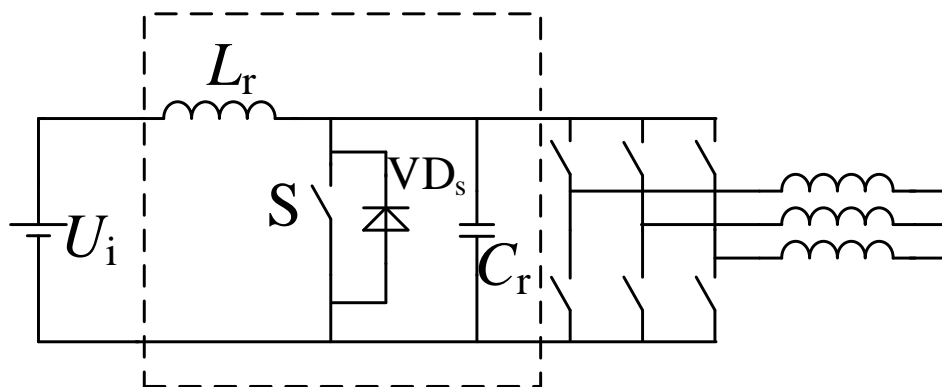
- 谐振直流环电路应用于交流-直流-交流变换电路的**中间直流环节**（DC-Link）。通过在直流环节中引入谐振，使电路中的整流或逆变环节工作在软开关的条件下。
- 辅助开关S可以使逆变桥中所有的开关工作在**零电压开通**的条件下。



### 8.3.3 谐振直流环



- 实际电路中开关S可以不需要，S的开关动作由逆变电路中开关的直通与关断来代替。
- 电压型逆变器的负载通常为感性，而且在谐振过程中逆变电路的开关状态是不变的，负载电流视为常量。



## 8.3.3 谐振直流环



■ 开关S关断时刻为起点。

■  $t_0 \sim t_1$ 时段：

$t_0$ 时刻之前，开关S处于通态， $i_{Lr} > I_L$ 。

$t_0$ 时刻S关断，电路中发生谐振。 $i_{Lr}$

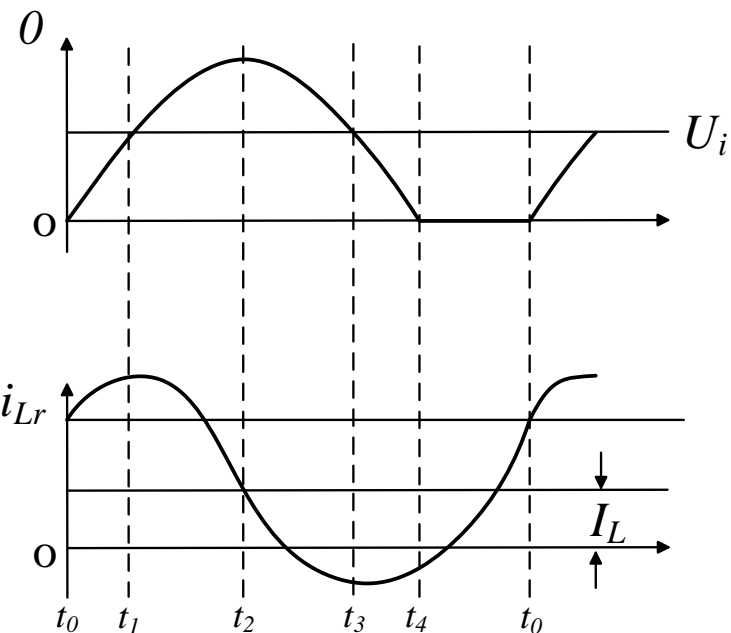
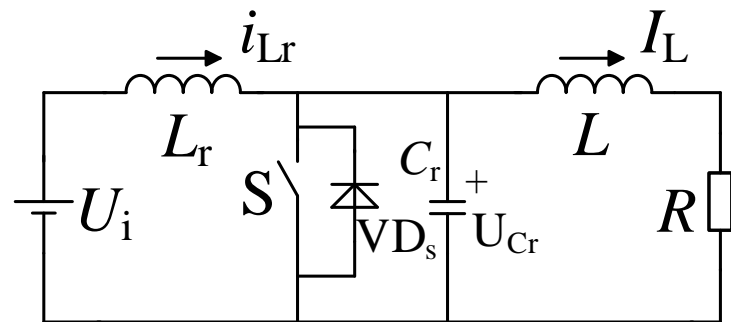
对 $C_r$ 充电， $t_1$ 时刻， $u_{Cr} = U_i$ 。

■  $t_1 \sim t_2$ 时段：

$t_1$ 时刻，谐振电流 $i_{Lr}$ 达到峰值。

$t_1$ 时刻以后， $i_{Lr}$ 继续向 $C_r$ 充电，直到

$t_2$ 时刻 $i_{Lr} = I_L$ ， $u_{Cr}$ 达到谐振峰值。

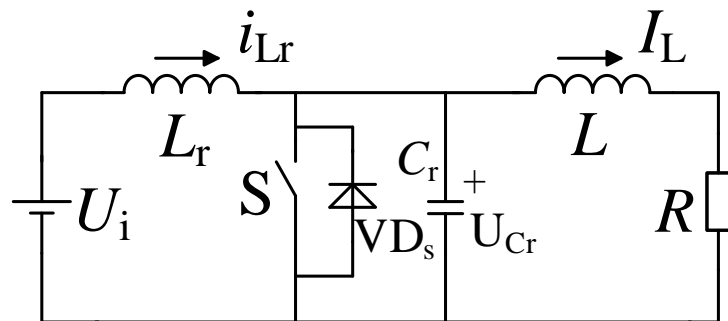


### 8.3.3 谐振直流环



#### ■ $t_2 \sim t_3$ 时段:

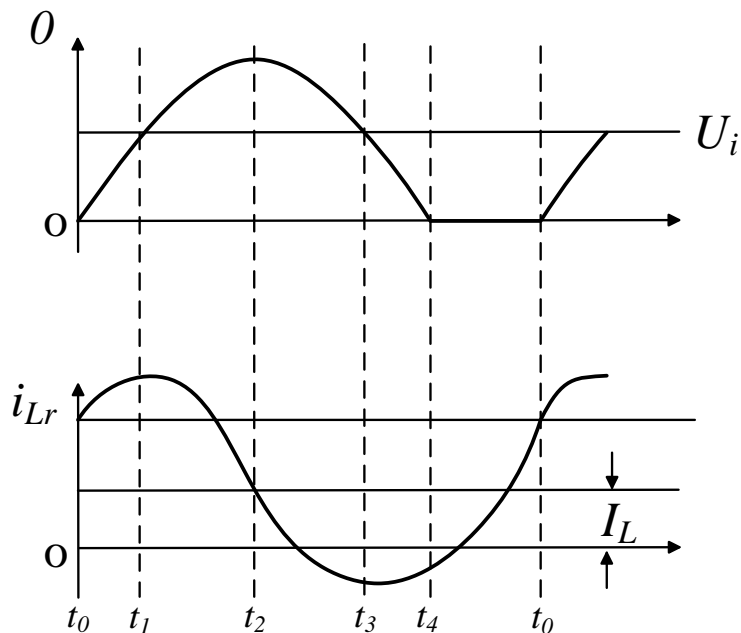
$u_{Cr}$  向  $L_r$  和  $L$  放电,  $i_{Lr}$  降低, 到零后反向, 直到  $t_3$  时刻  $u_{Cr} = U_i$ 。



#### ■ $t_3 \sim t_4$ 时段:

$t_3$  时刻,  $i_{Lr}$  达到反向谐振峰值, 开始衰减,  $u_{Cr}$  继续下降。

$t_4$  时刻,  $u_{Cr} = 0$ ,  $S$  的反并联二极管  $VD_s$  导通,  $u_{Cr}$  被箝位于零。

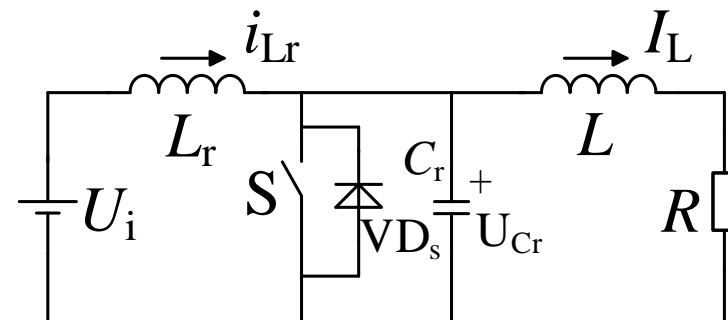


### 8.3.3 谐振直流环

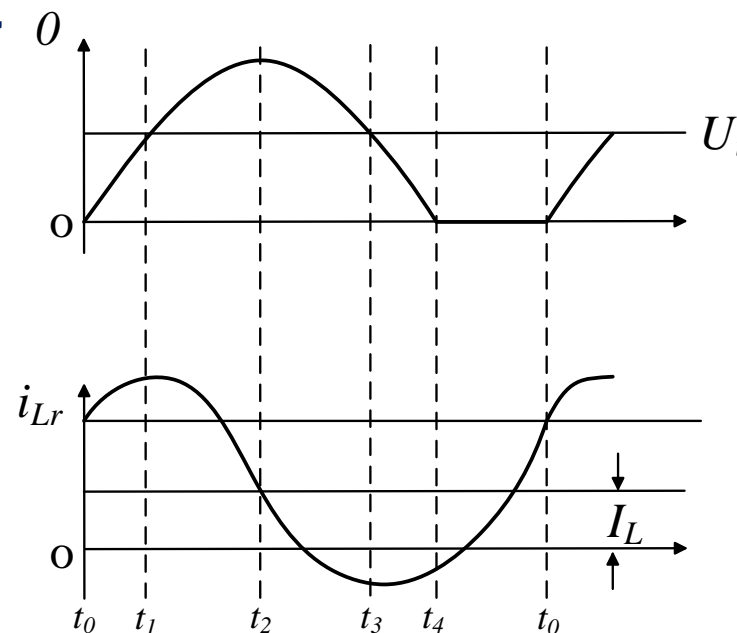


■  $t_4 \sim t_0$  时段:

S 导通, 电流  $i_{Lr}$  线性上升, 直到  $t_0$  时刻, S 再次关断。



缺点: 电压谐振峰值很高, 增加了对开关器件耐压的要求。

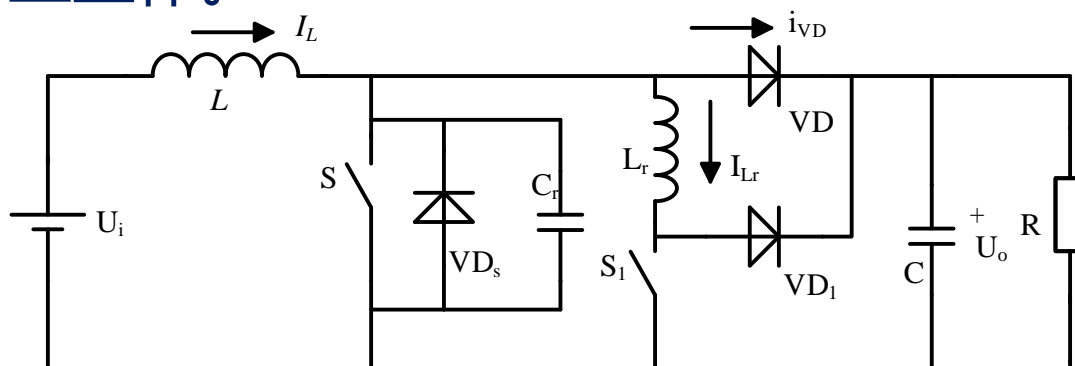




## 8.3.4 零电压转换PWM电路



- 具有电路简单、效率高等优点。
- 基本思路：
  - 开关S关断时，与之并联的缓冲电容 $C_r$ 限制电压的上升率，实现零电压关断；
  - 开关S开通时，必须将 $C_r$ 上的电荷释放到零，以实现零电压导通。为此需要附加一个辅助电路（ $L_r$ ， $VD_1$ 和 $S_1$ ），辅助电路在S完成零电压开通后，立即停止工作。

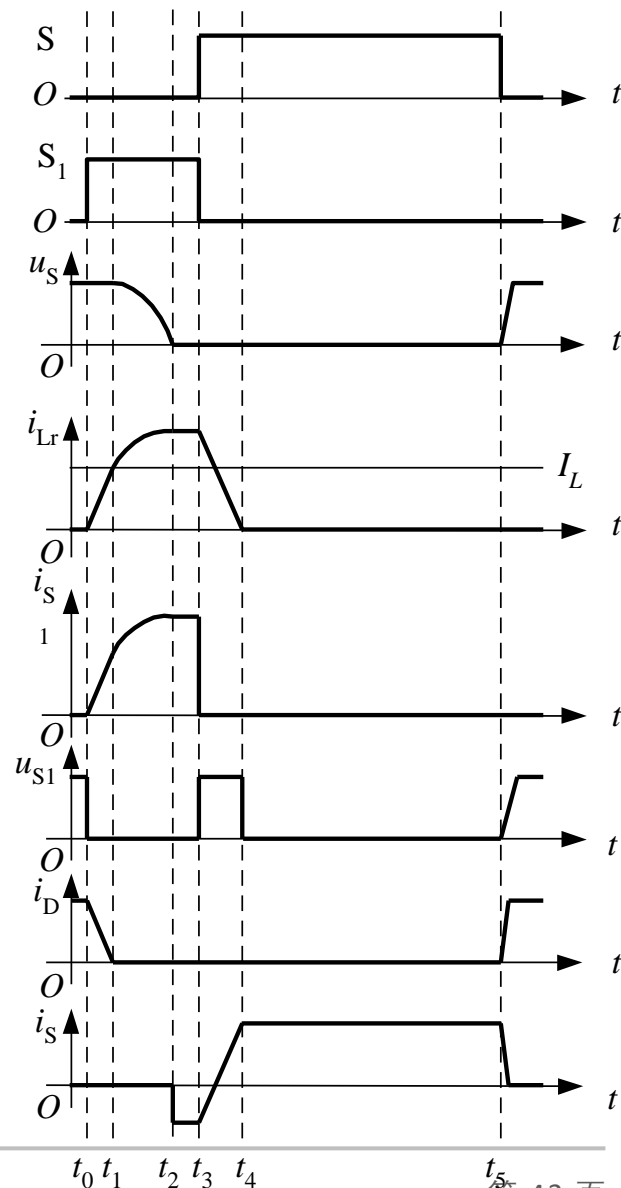
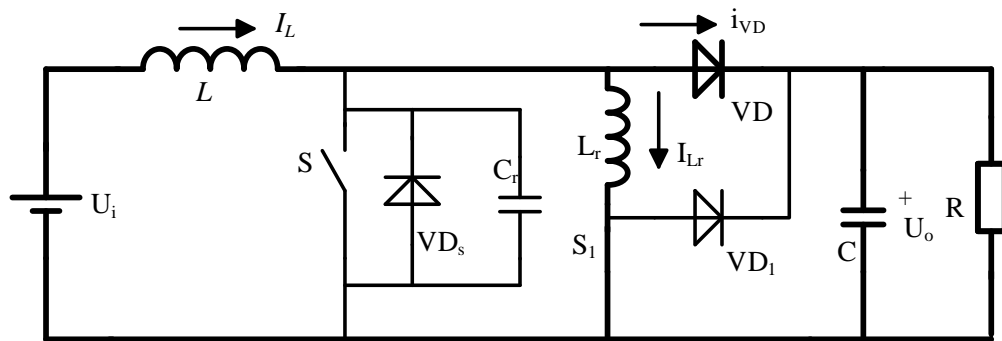


## 8.3.4 零电压转换PWM电路



■ 辅助开关 $S_1$ 超前于主开关 $S$ 开通， $S$ 开通后 $S_1$ 关断。

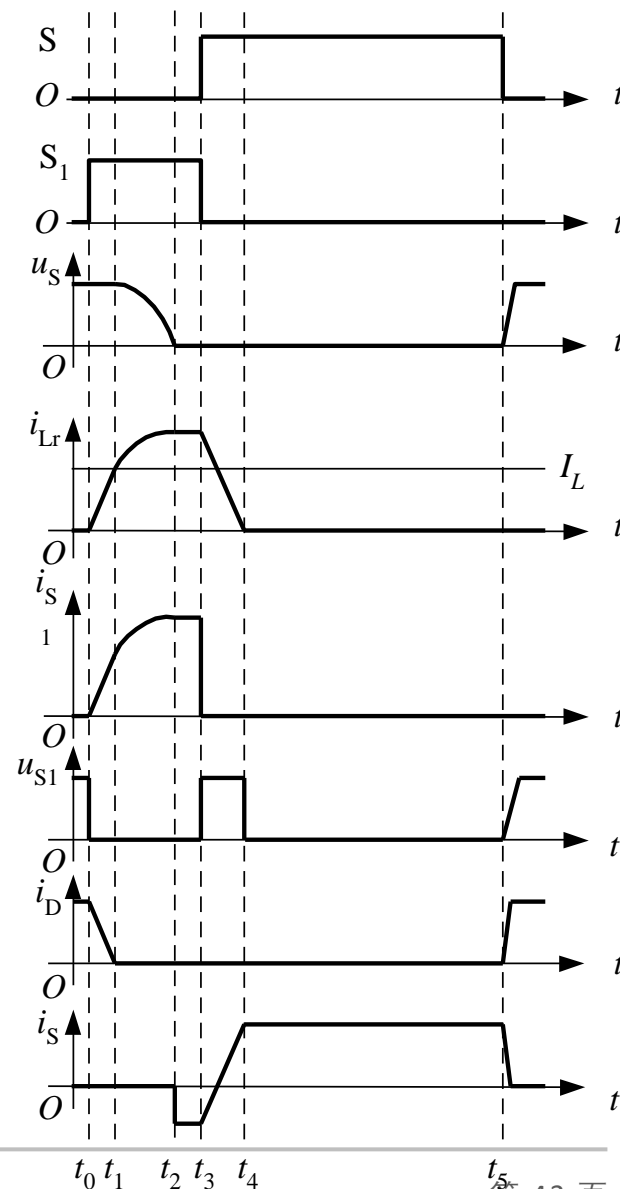
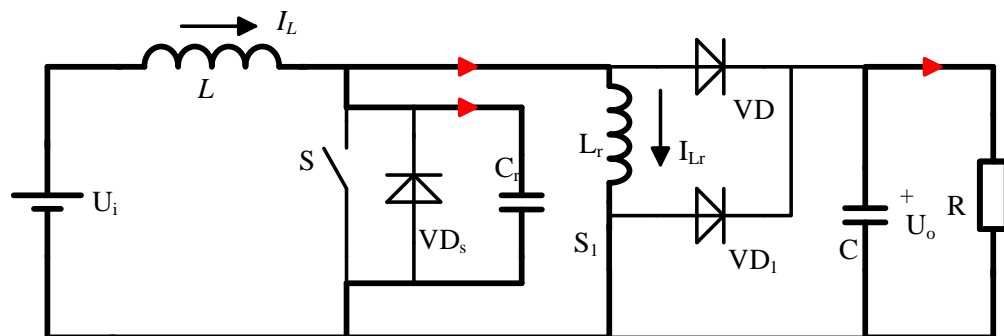
$t_0 \sim t_1$ 时段： $S_1$ 导通，VD尚处于通态，电感 $L_r$ 两端电压为 $U_o$ ，电流 $i_{L_r}$ 线性增长，VD中的电流以同样的速率下降。  
 $t_1$ 时刻， $i_{L_r} = I_L$ ，VD中电流下降到零，关断。



## 8.3.4 零电压转换PWM电路



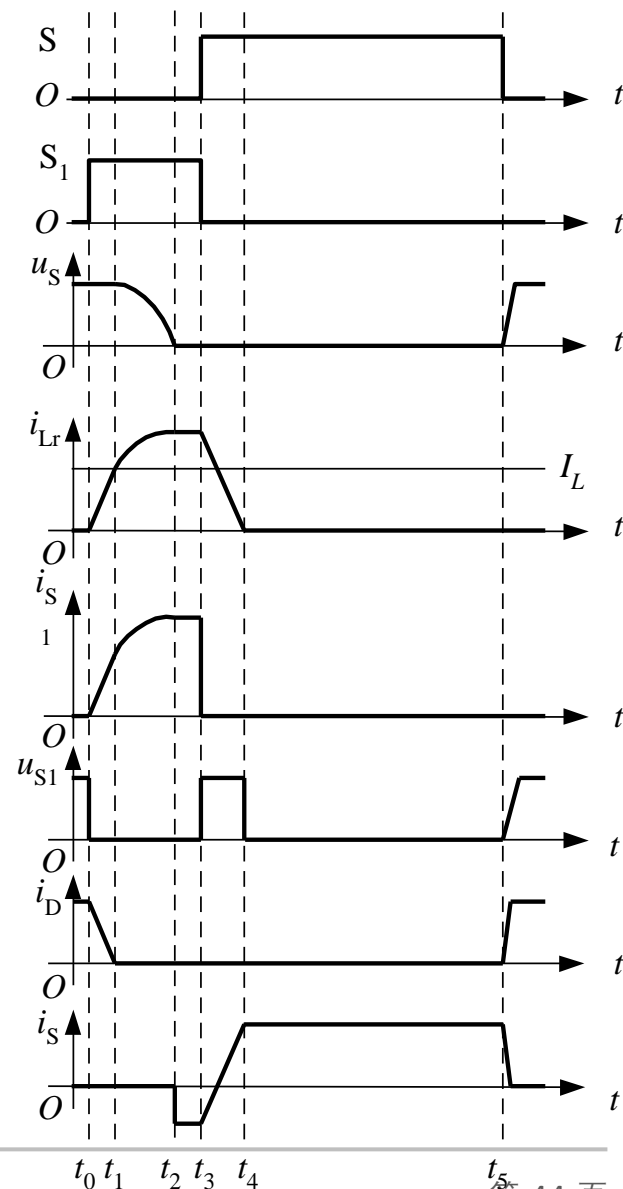
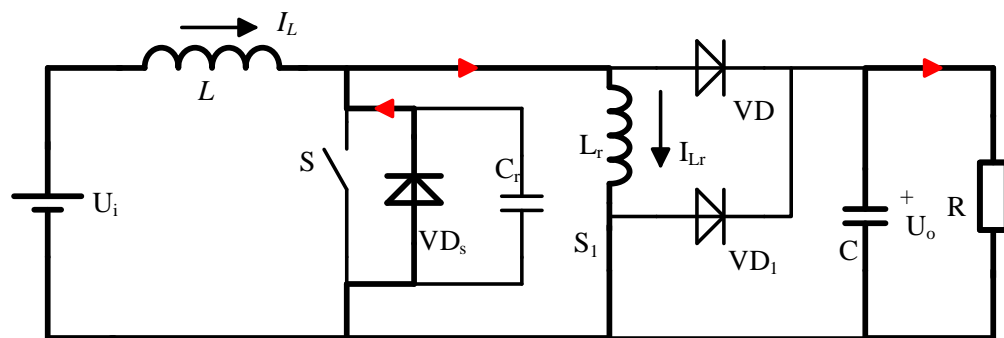
$t_1 \sim t_2$ 时段:  $L_r$ 与 $C_r$ 构成谐振回路,  $L_r$ 的电流增加而 $C_r$ 的电压下降,  $t_2$ 时刻 $u_{Cr}=0$ ,  $VD_S$ 导通,  $u_{Cr}$ 被箝位于零, 而电流 $i_{Lr}$ 保持不变。



## 8.3.4 零电压转换PWM电路



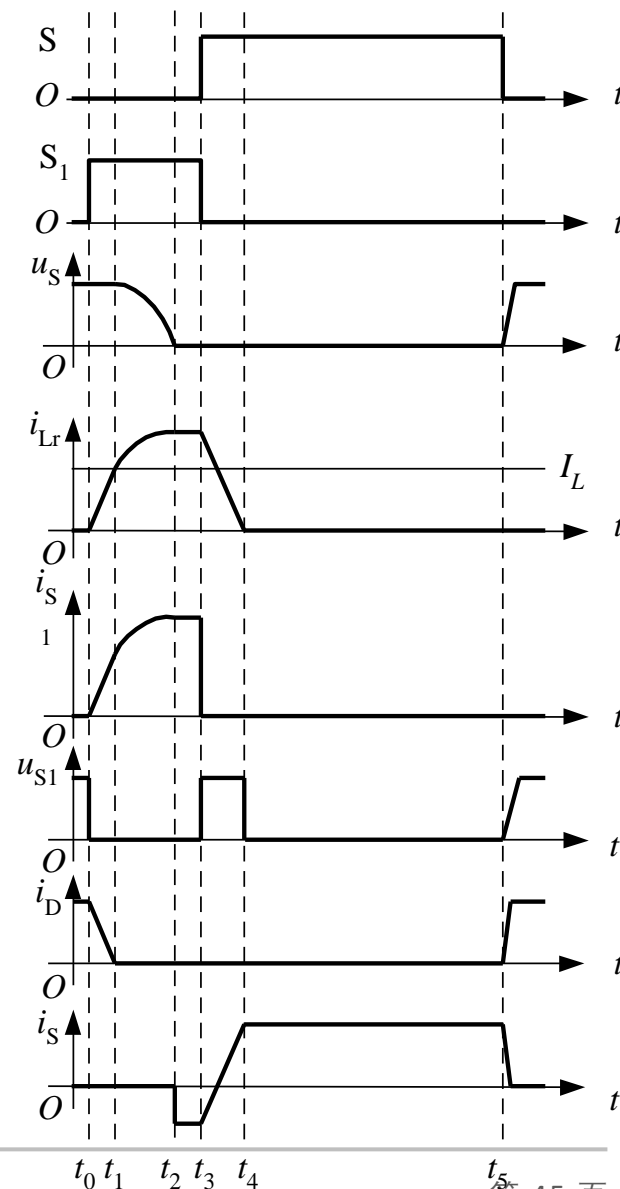
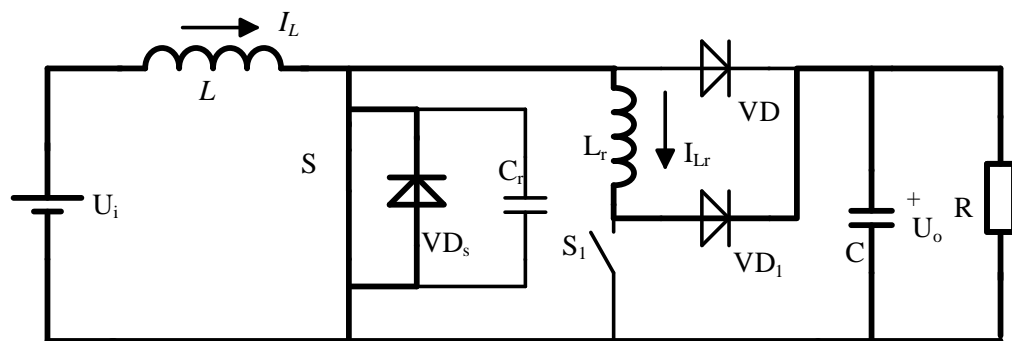
$t_2 \sim t_3$ 时段： $u_{Cr}$ 被箝位于零，而电流 $i_{Lr}$ 保持不变，这种状态一直保持到 $t_3$ 时刻S开通、 $S_1$ 关断。



## 8.3.4 零电压转换PWM电路



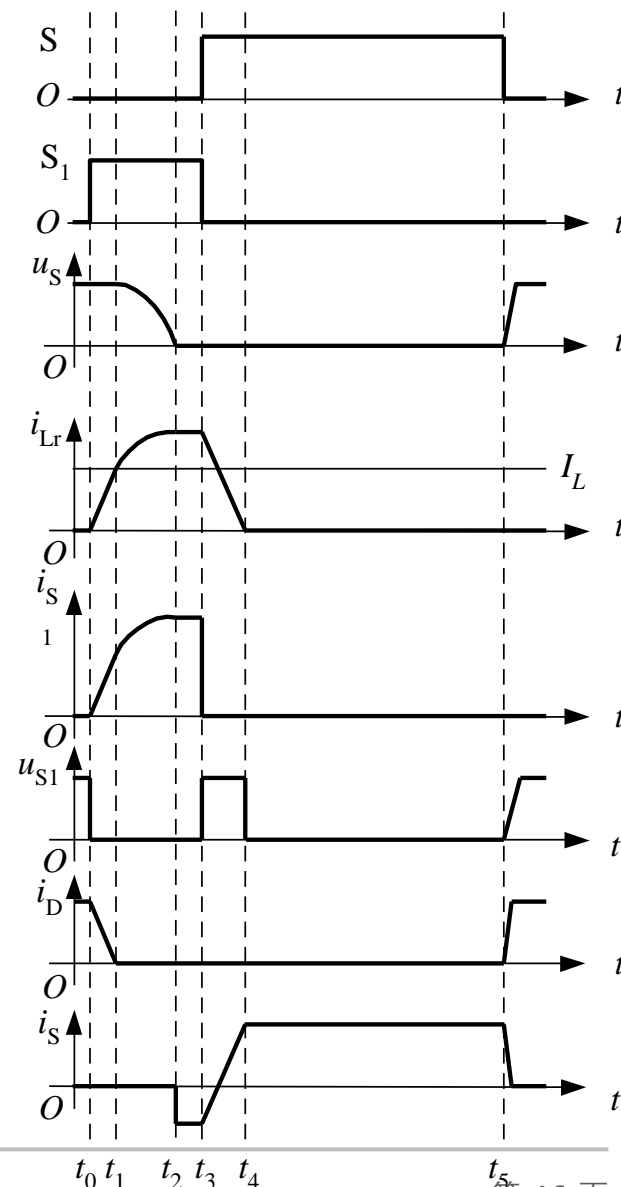
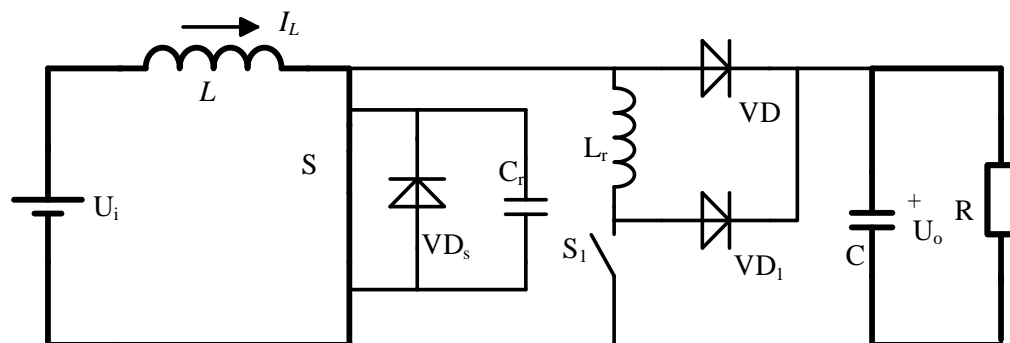
$t_3 \sim t_4$ 时段:  $t_3$ 时刻S开通时, 为零电压开通。S开通的同时 $S_1$ 关断,  $L_r$ 中的能量通过 $VD_1$ 向负载侧输送, 其电流线性下降, 主开关S中的电流线性上升。  
 $t_4$ 时刻 $i_{Lr}=0$ ,  $VD_1$ 关断, 主开关S中的电流 $i_S=I_L$ , 电路进入正常导通状态。



## 8.3.4 零电压转换PWM电路



$t_4 \sim t_5$ 时段： $t_5$ 时刻S关断。 $C_r$ 限制了S电压的上升率，降低了S的关断损耗。





- 8.4.1 软开关技术新进展
- 8.4.2 小结

## 8.4.1 软开关技术新进展



- 软开关技术有以下几个重要的发展趋势
  - 新的软开关电路拓扑的数量仍在不断增加，软开关技术的应用也越来越普遍。
  - 在开关频率接近甚至超过1MHz、对效率要求又很高的场合，曾经被遗忘的谐振电路又重新得到应用，并且表现出很好的性能。
  - 采用几个简单、高效的开关电路，通过级联、并联和串连构成组合电路，替代原来的单一电路成为一种趋势，在不少应用场合，组合电路的性能比单一电路显著提高。



- 软开关技术通过在电路中引入谐振改善了开关的开关条件，大大降低了硬开关电路存在的**开关损耗**和**开关噪声**问题。
- 软开关技术总的来说可以分为零电压和零电流两类。按照其出现的先后，可以将其分为准谐振、零开关PWM和零转换PWM三大类。每一类都包含基本拓扑和众多的派生拓扑。
- 零电压开关准谐振电路、零电压开关PWM电路和零电压转换PWM电路分别是三类软开关电路的代表；谐振直流环电路是软开关技术在逆变电路中的典型应用。



■作业：XXXXXXXXXX