

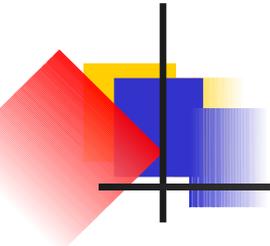
# 第二十四讲

## 软开关技术

教师：孔祥新

地点：JA202

曲阜师范大学 电气信息与自动化学院



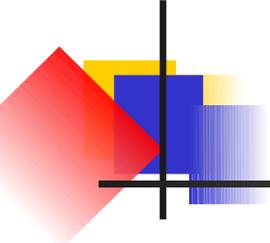
# 软开关技术. 引言

---

**24.1 软开关的基本概念**

**24.2 软开关电路的分类**

**24.3 典型的软开关电路**



# 软开关技术· 引言

## ● 现代电力电子装置的**发展趋势**

- ✦ 小型化、轻量化、对效率和电磁兼容性也有更高的要求。

## ● 电力电子装置高频化

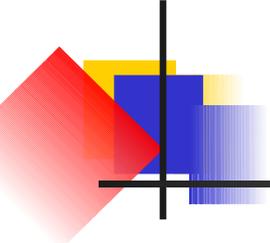
- ✦ 滤波器、变压器体积和重量减小，电力电子装置小型化、轻量化。

- ✦ 开关损耗增加，电磁干扰增大。

## ● 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。



# 24.1 软开关的基本概念

---

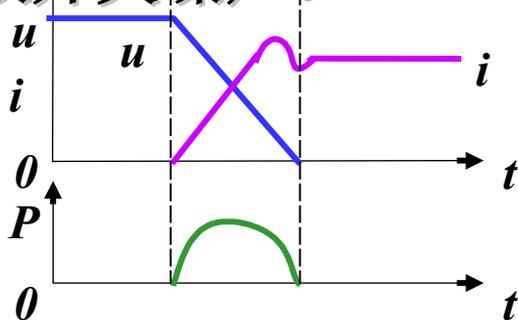
24.1.1 硬开关和软开关

24.1.2 零电压开关和零电流开关

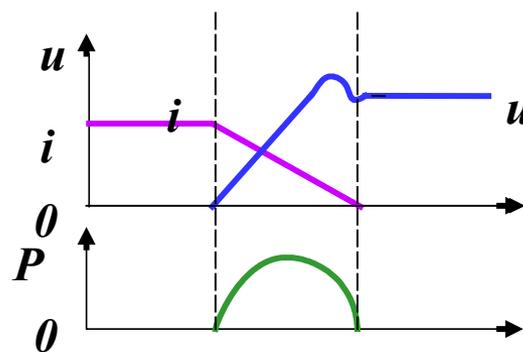
# 24.1.1 硬开关和软开关

- 硬开关:

- ⊕ 开关过程中电压和电流均不为零，出现了重叠。
- ⊕ 电压、电流变化很快，波形出现明显得过冲，导致开关噪声。



a) 硬开关的开通过程



b) 硬开关的关断过程

图 7-1 硬开关的开关过程

# 24.1.1 硬开关和软开关

## ● 软开关:

- ⊕ 在原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，消除电压、电流的重叠。
- ⊕ 降低开关损耗和开关噪声。

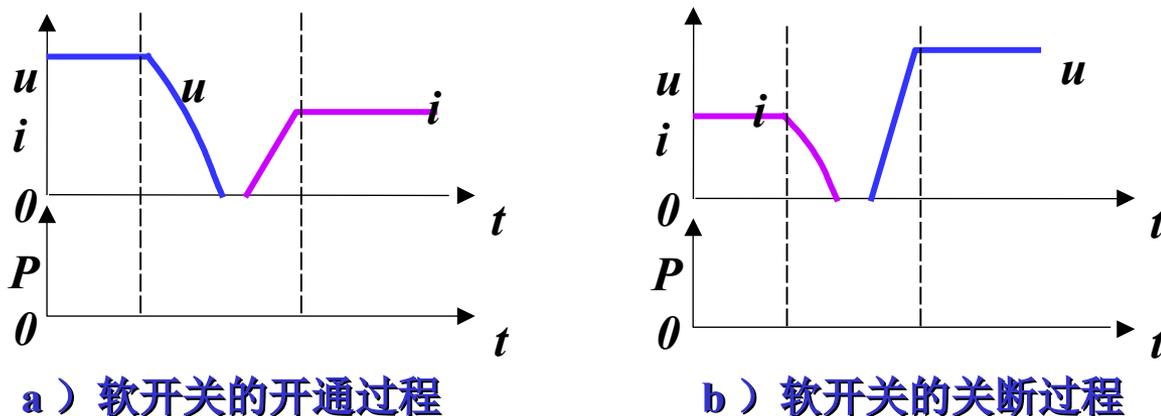


图 7-2 软开关的开关过程

## 24.1.2 零电压开关和零电流开

### 关

#### ■ 零电压开通

- 开关开通前其两端电压为零——开通时不会产生损耗和噪声。

#### ■ 零电流关断

- 开关关断前其电流为零——关断时不会产生损耗和噪声。

#### ■ 零电压关断

- 与开关并联的电容能延缓开关关断后电压上升的速率，从而降低关断损耗。

#### ■ 零电流开通

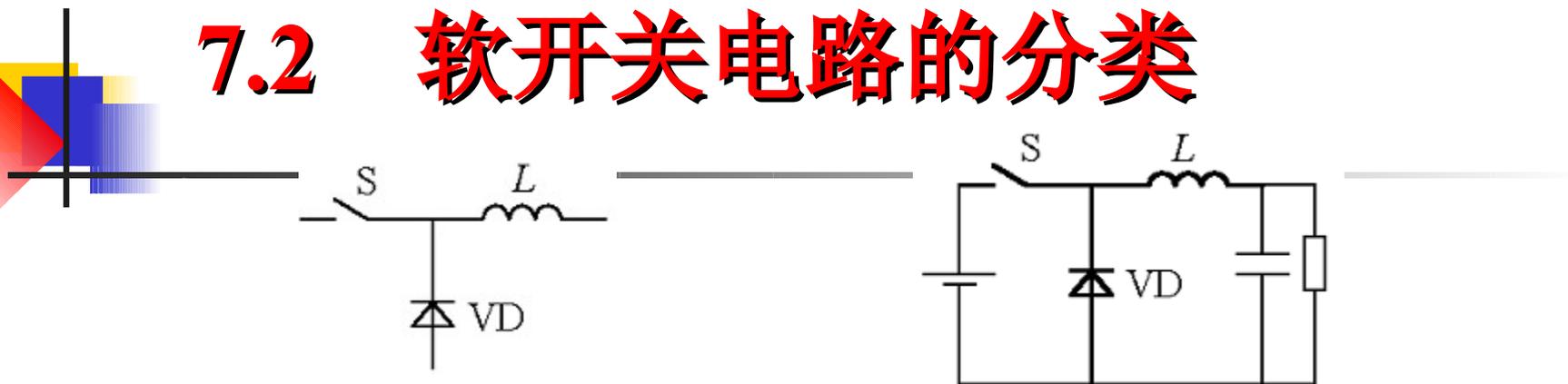
- 与开关串联的电感能延缓开关开通后电流上升的速率，降低了开通损耗。

当不指出是开通或是关断，仅称**零电压开关**和**零电流开关**。  
靠电路中的谐振来实现。

## 7.2 软开关电路的分类

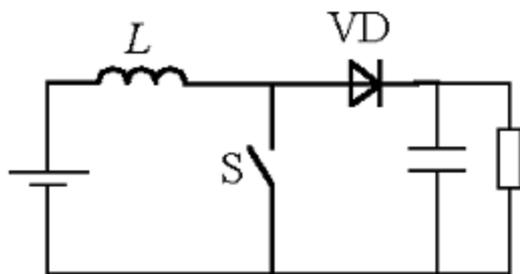
- 根据开关元件开通和关断时电压电流状态，分为**零电压电路**和**零电流电路**两大类。
- 根据软开关技术发展的历程可以将软开关电路分成**准谐振电路**、**零开关 PWM 电路**和**零转换 PWM 电路**。
- 每一种软开关电路都可以用于降压型、升压型等不同电路，可以从**基本开关单元**导出具体电路。

## 7.2 软开关电路的分类

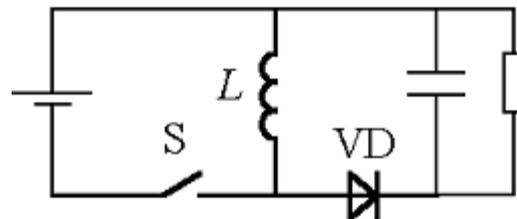


a) 基本开关单元

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

图 7 - 3 基本开关单元的概念

# 7.2 软开关电路的分类

## 分别介绍三类软开关电路

### 1) 准谐振电路

- 准谐振电路—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。是最早出现的软开关电路。

#### 特点：

- 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（Pulse Frequency Modulation—PFM）方式来控制。

# 7.2 软开关电路的分类

可分为 零电压开关准谐振电路

(Zero-Voltage-Switching Quasi-Resonant Converter—ZVS QRC)

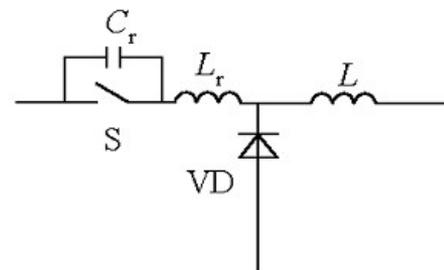
零电流开关准谐振电路

(Zero-Current-Switching Quasi-Resonant Converter—ZCS QRC)

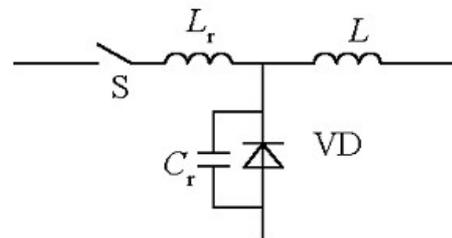
电压开关多谐振电路

(Zero-Voltage-Switching Multi-Resonant Converter—ZVS MRC)

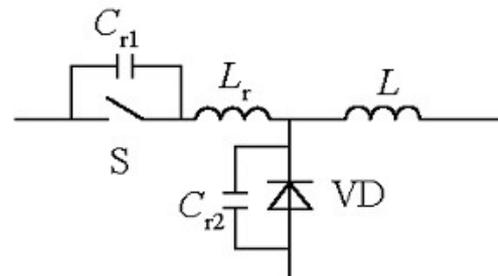
用于逆变器的谐振直流环节电路 (Resonant DC Link)。



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



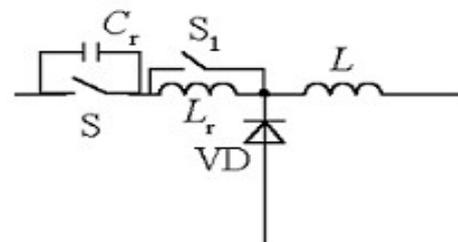
c) 零电压开关多谐振电路的基本开关单元

图 7-4 准谐振电路的基本开关单元

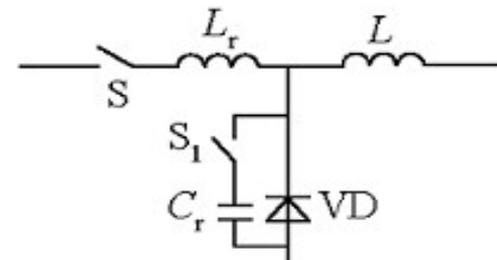
# 7.2 软开关电路的分类

## 2) 零开关 PWM 电路

- ✦ 引入了辅助开关来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 电路可以分为：
  - ✦ 零电压开关 PWM 电路 ( Zero-Voltage-Switching PWM Converter—ZVS PWM )
  - ✦ 零电流开关 PWM 电路 ( Zero-Current-Switching PWM Converter—ZCS PWM )
- ✦ 特点：
  - ✦ 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。



a) 零电压开关 PWM 电路的基本开关单元



b) 零电流开关 PWM 电路的基本开关单元

图 7-5 零开关 PWM 电路的基本开关单元

# 7.2 软开关电路的分类

## 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 电路可以分为：

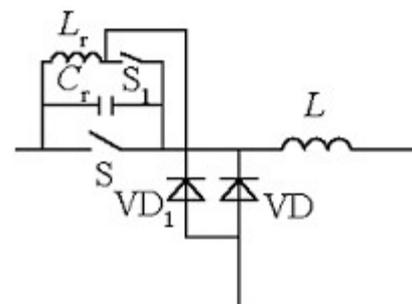
零电压转换 PWM 电路（Zero-Voltage-Transition PWM Converter—ZVT PWM

零电流转换 PWM 电路（Zero-Current Transition PWM Converter—ZCT PWM）

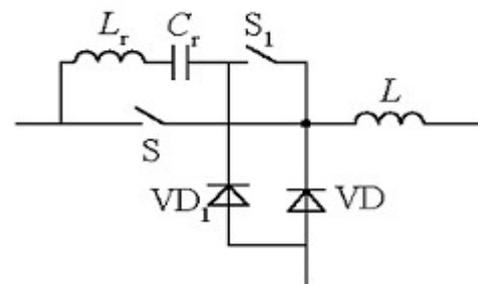
### 特点：

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。

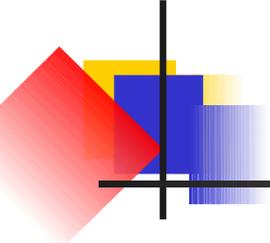


a) 零电压转换 PWM 电路的基本开关单元



b) 零电流转换 PWM 电路的基本开关单元

图 7-6 零转换 PWM 电路的基本开关单元



## 24.3 典型的软开关电路

---

24.3.1 零电压开关谐振电路

24.3.2 谐振直流环

24.3.3 移相全桥型零电压开关 PWM 电路

24.3.4 零电压转换 PWM 电路

## 24.3.1 零电压开关谐振电路

### 1) 电路结构

以降压型为例分析工作原理。

假设电感  $L$  和电容  $C$  很大，可等效为电流源和电压源，并忽略电路中的损耗。

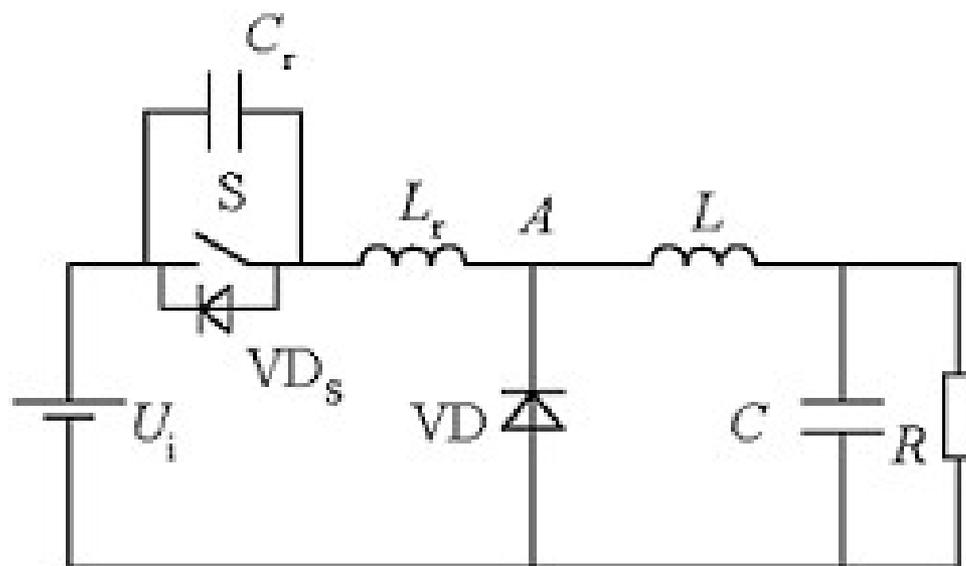
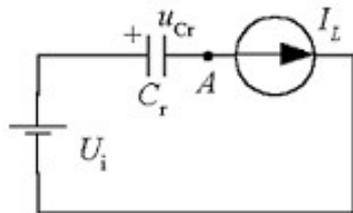


图 7-7 零电压开关准谐振电路原理图

# 24.3.1 零电压开关谐振电路

## 2) 工作原理



$t_0 \sim t_1$  时段的  
等效电路

- 选择开关 S 关断时刻为分析的起点。
- $t_0 \sim t_1$  时段： $t_0$  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：

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

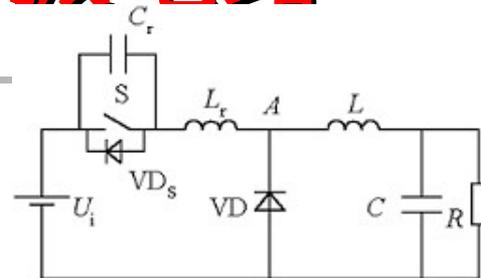


图 7-7 零电压开关准谐振电路原理

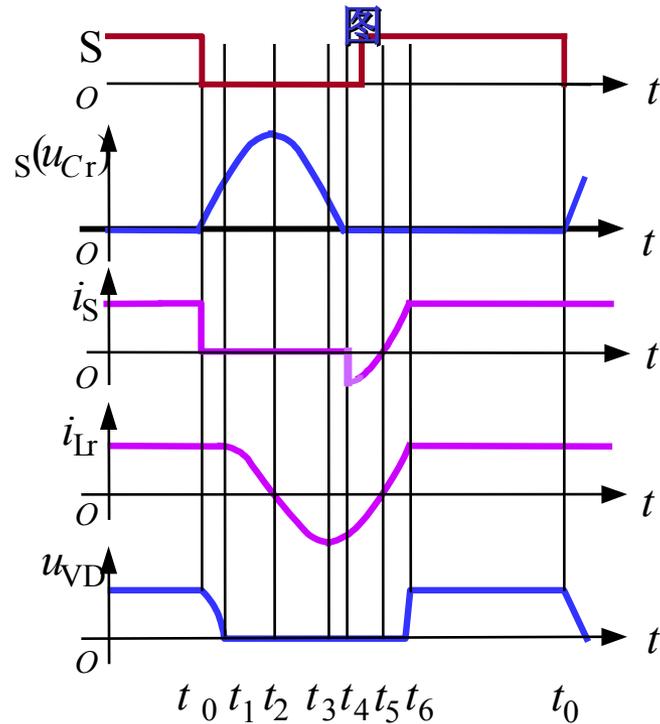
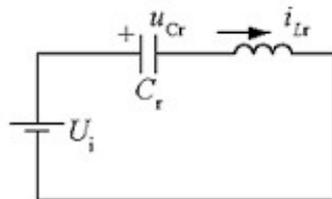


图 7-8 零电压开关准谐振电路的理想波形

# 24.3.1 零电压开关谐振电路



t1~t2 时段的  
等效电路

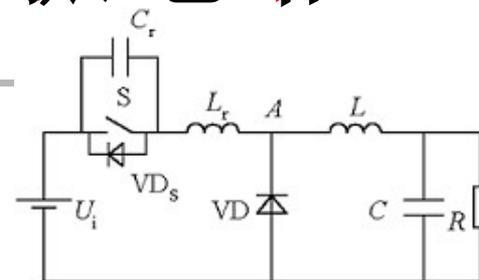


图 7-7 零电压开关准谐振电路原理

- t1~t2 时段：t1 时刻二极管 VD 导通，电感 L 通过 VD 续流，C<sub>r</sub>、L<sub>r</sub>、U<sub>i</sub> 形成谐振回路。t2 时刻，i<sub>Lr</sub> 下降到零，u<sub>Cr</sub> 达到谐振峰值。
- t2~t3 时段：t2 时刻后，C<sub>r</sub> 向 L<sub>r</sub> 放电，直到 t3 时刻，u<sub>Cr</sub>=U<sub>i</sub>，i<sub>Lr</sub> 达到反向谐振峰值。
- t3~t4 时段：t3 时刻以后，L<sub>r</sub> 向 C<sub>r</sub> 反向充电，u<sub>Cr</sub> 继续下降，直到 t4 时刻 u<sub>Cr</sub>=0。

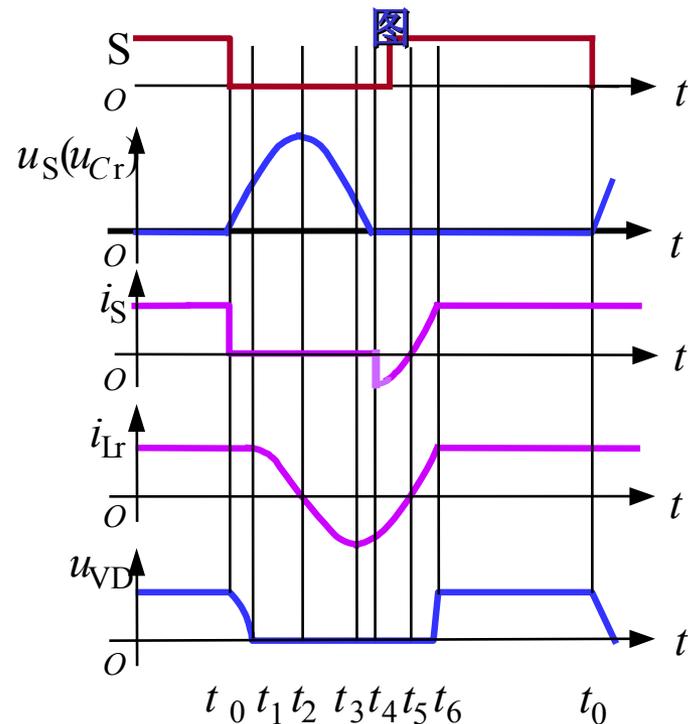


图 7-8 零电压开关准谐振电路的理想波形

# 24.3.1 零电压开关谐振电路

- $t_4 \sim t_5$  时段:  $u_{Cr}$  被箝位于零,  $i_{Lr}$  线性衰减, 直到  $t_5$  时刻,  $i_{Lr} = 0$ 。由于此时开关  $S$  两端电压为零, 所以必须在此时开通  $S$ , 才不会产生开通损耗。
- $t_5 \sim t_6$  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。

$t_6 \sim t_0$  时段:  $S$  为通态,  $VD$  为断态  
**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。

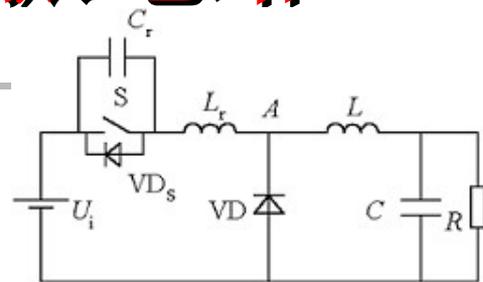


图 7-7 零电压开关准谐振电路原理图

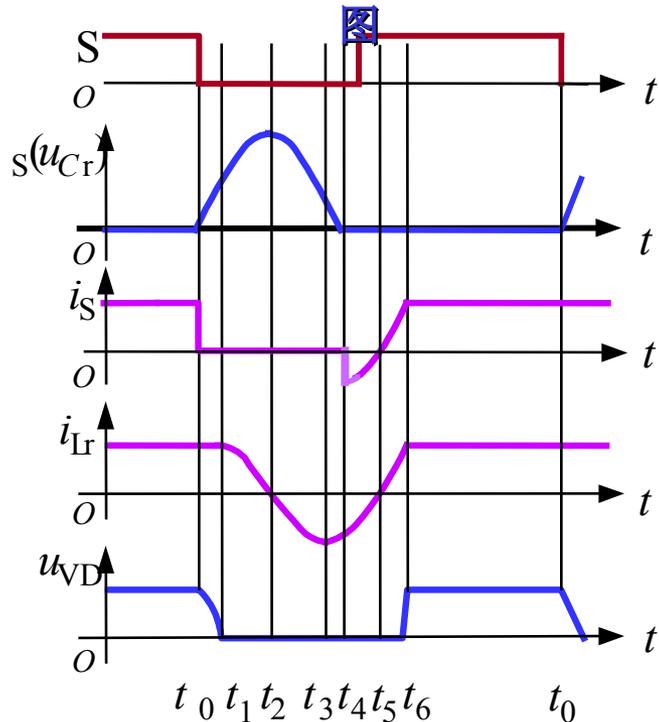


图 7-8 零电压开关准谐振电路的理想波形

## 24.3.2 谐振直流环

### 1) 电路结构

- 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。
- 由于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，因此分析时可将电路等效。

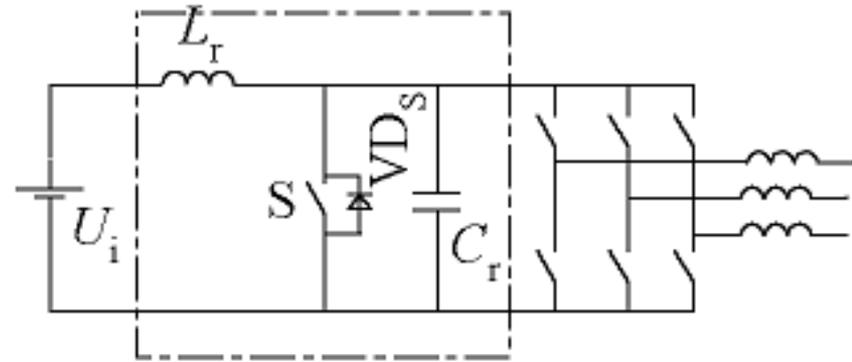


图 7-11 谐振直流环电路原理图

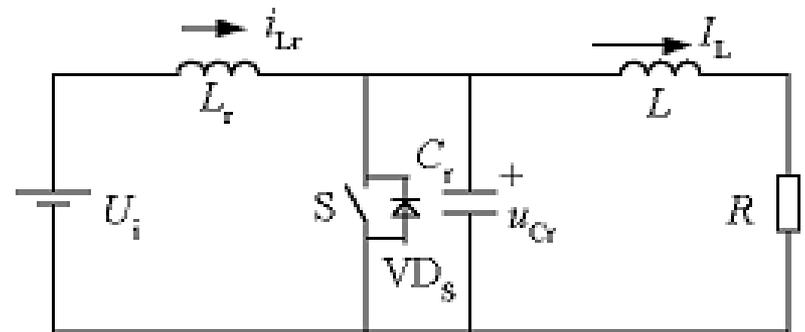


图 7-12 谐振直流环电路的等效电路

## 24.3.2 谐振直流环

### 2) 工作原理

- ⊕  $t_0 \sim t_1$  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。

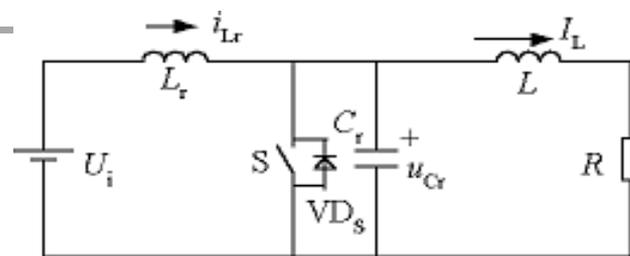


图 7-12 谐振直流环电路的等效电路

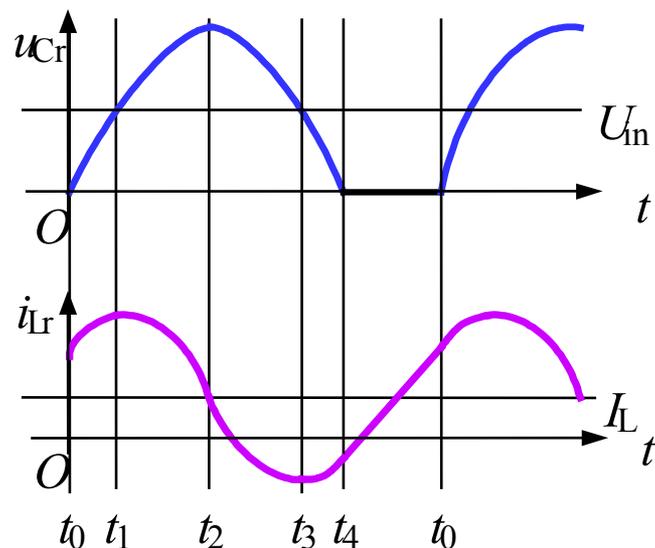


图 7-13 谐振直流环电路的理想化波形

## 24.3.2 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。
- $t_4 \sim t_0$  时段: S 导通, 电流  $i_{Lr}$  线性上升, 直到  $t_0$  时刻, S 再次关断。

电压谐振峰值很高, 增加了对开关器件**耐压**的要求。

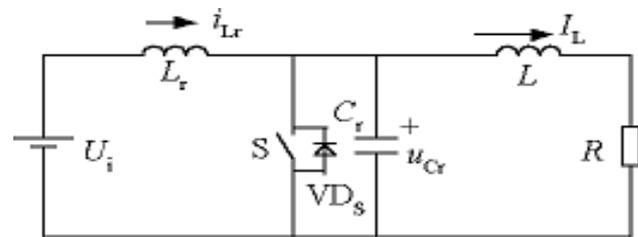


图 7-12 谐振直流环电路的等效电路

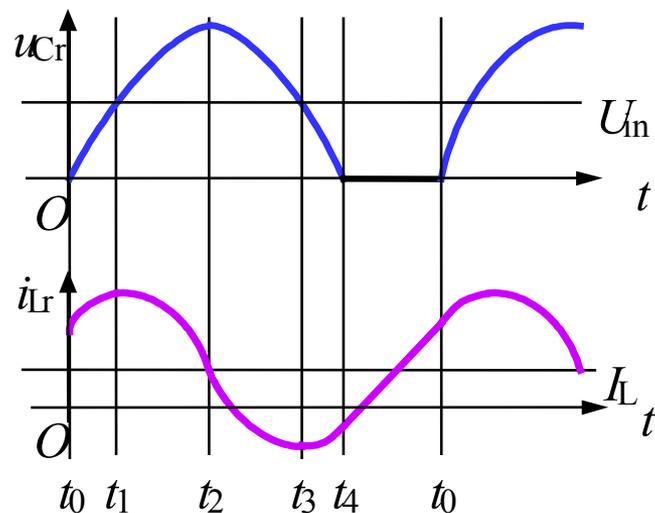


图 7-13 谐振直流环电路的理想化波形

## 24.3.3 移相全桥型零电压开关 PWM 电路

- 移相全桥电路是目前应用最广泛的软开关电路之一，它的特点是电路简单。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。

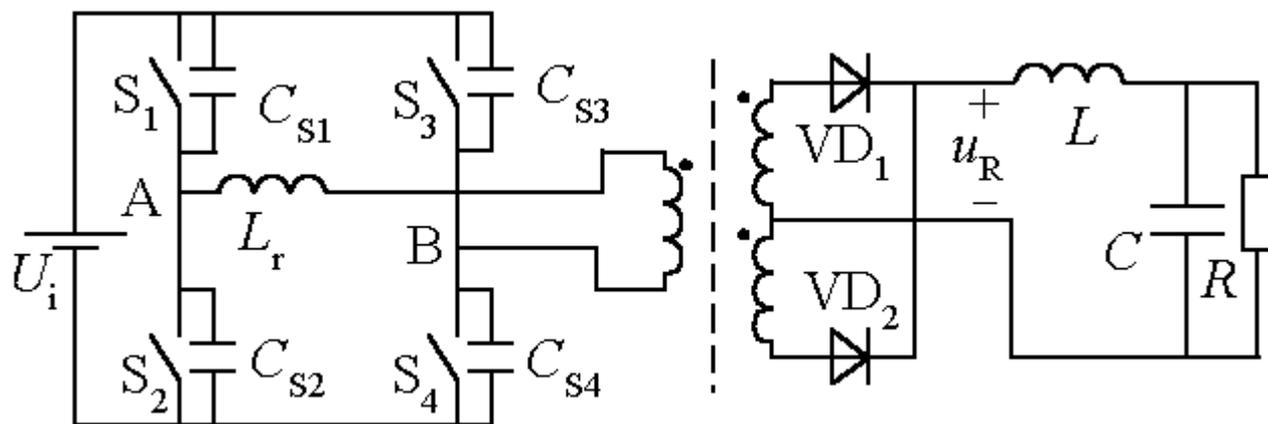


图 7-14 移相全桥零电压开关 PWM 电路

# 24.3.3 移相全桥型零电压开关 PWM 电路

## 1) 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。

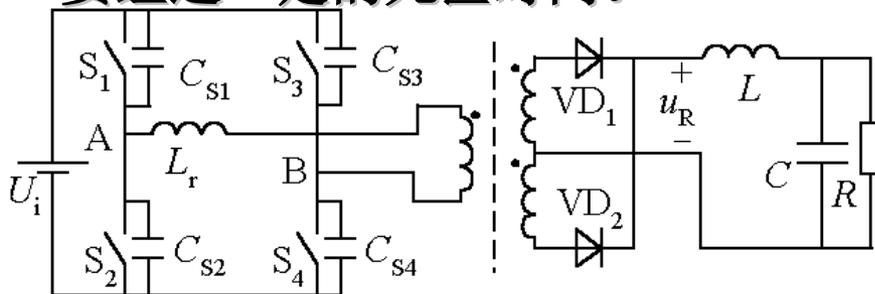


图 7-14 移相全桥零电压开关 PWM 电路

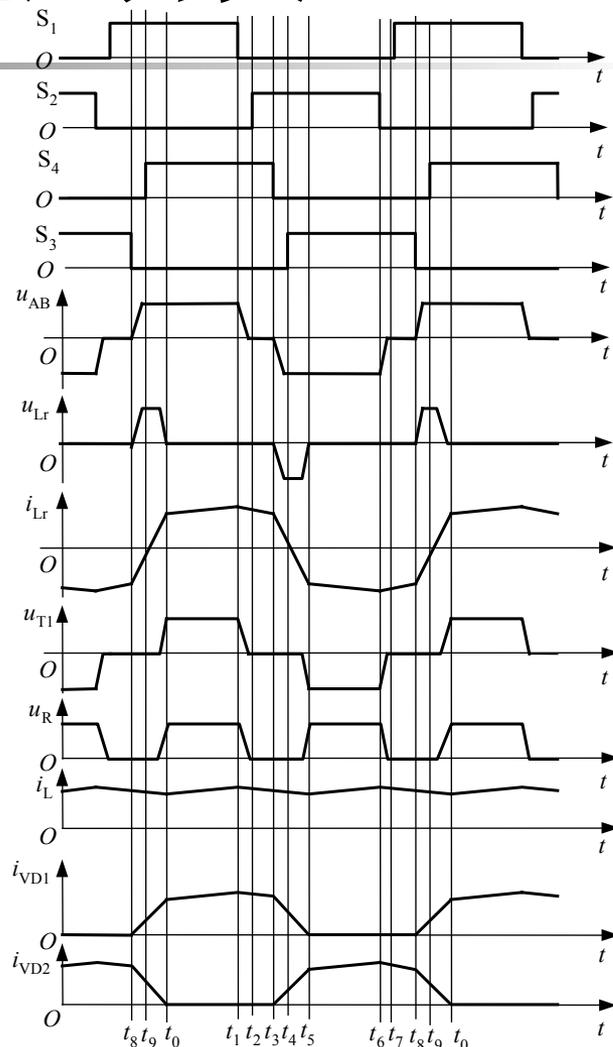


图 7-15 移相全桥电路的理想化波形

# 24.3.3 移相全桥型零电压开关 PWM 电路

- 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。

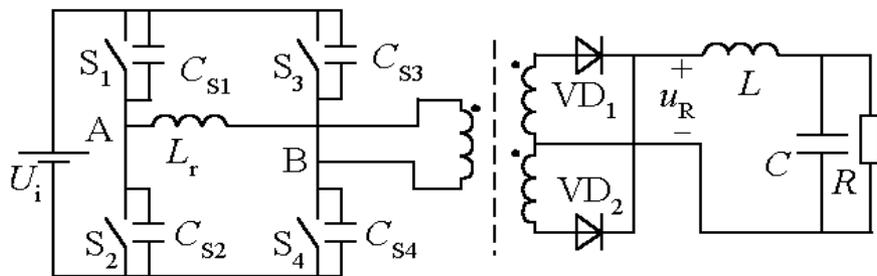


图 7-14 移相全桥零电压开关 PWM 电路

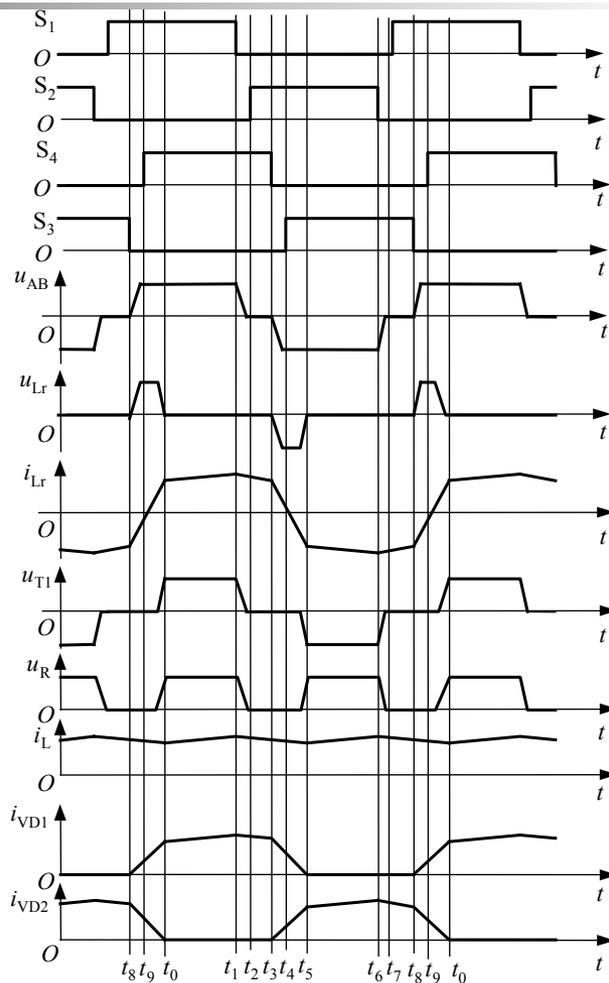


图 7-15 移相全桥电路的理想化波形

# 24.3.3 移相全桥型零电压开关 PWM 电 路

## 2) 工作过程:

- ✦  $t_0 \sim t_1$  时段:  $S_1$  与  $S_4$  导通, 直到  $t_1$  时刻  $S_1$  关断。
- ✦  $t_1 \sim t_2$  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,  $u_A$  不断下降, 直到  $u_A=0$ ,  $V_{DS2}$  导通, 电流  $i_{Lr}$  通过  $V_{DS2}$  续流。
- ✦  $t_2 \sim t_3$  时段:  $t_2$  时刻开关  $S_2$  开通, 由于此时其反并联二极管  $V_{DS2}$  正处于导通状态, 因此  $S_2$  为零电压开通。

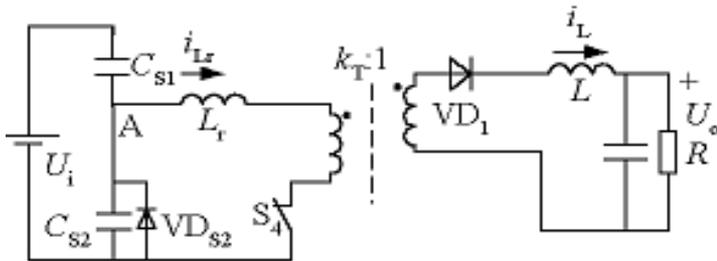


图 7-16 移相全桥电路在  $t_0 \sim t_1$  阶段的等效电路

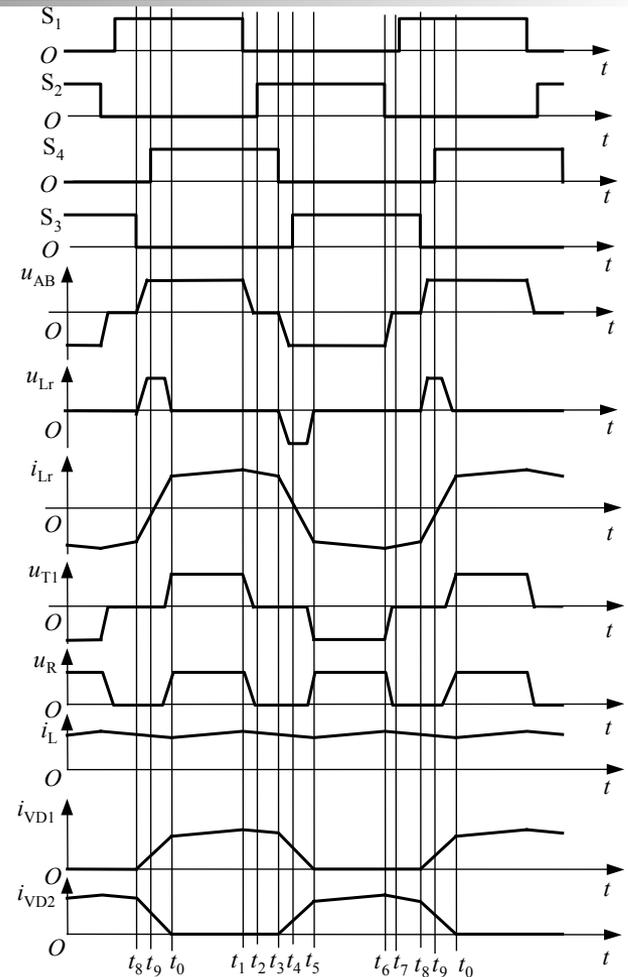


图 7-15 移相全桥电路的理想化波形

# 24.3.3 移相全桥型零电压开关 PWM 电路

$t_3 \sim t_4$  时段:  $t_3$  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  $V_{DS3}$  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。

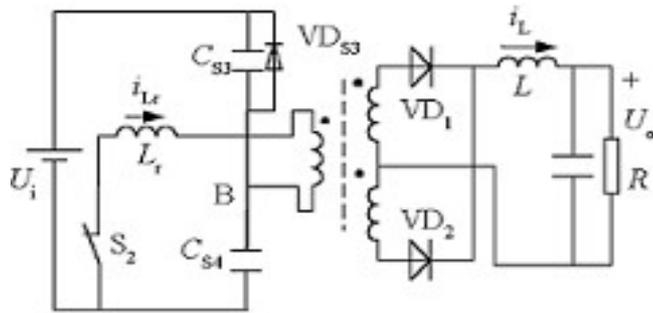


图 7-17 移相全桥电路在  $t_3 \sim t_4$  阶段的等效电路

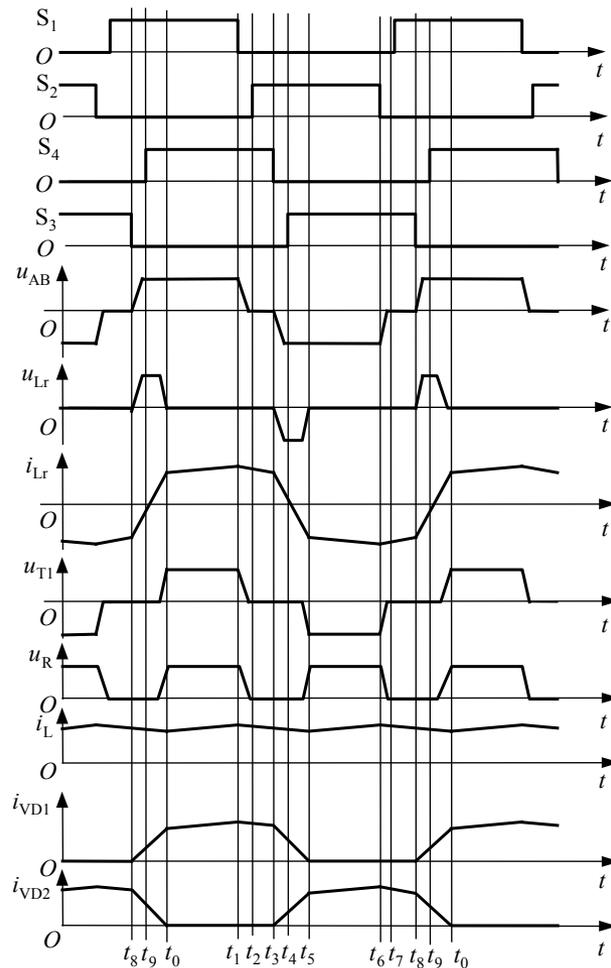


图 7-15 移相全桥电路的理想化波形

# 24.3.3 移相全桥型零电压开关 PWM 电路

- t4~t5 时段：** S3 开通后，Lr 的电流继续减小。iLr 下降到零后反向增大，t5 时刻  $i_{Lr} = I_L / kT$ ，变压器二次侧 VD1 的电流下降到零而关断，电流 IL 全部转移到 VD2 中。
- t0~t5 是开关周期的一半，另一半工作过程完全对称。**

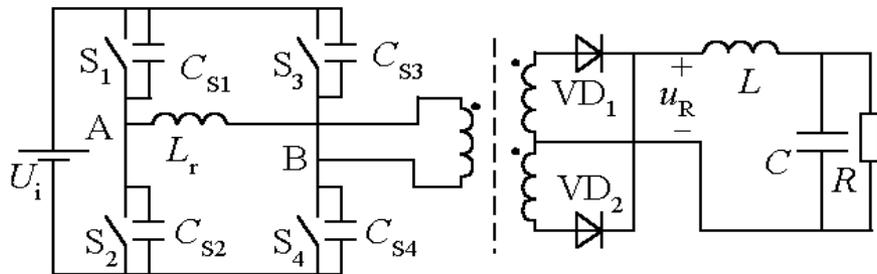


图 7-14 移相全桥零电压开关 PWM 电路

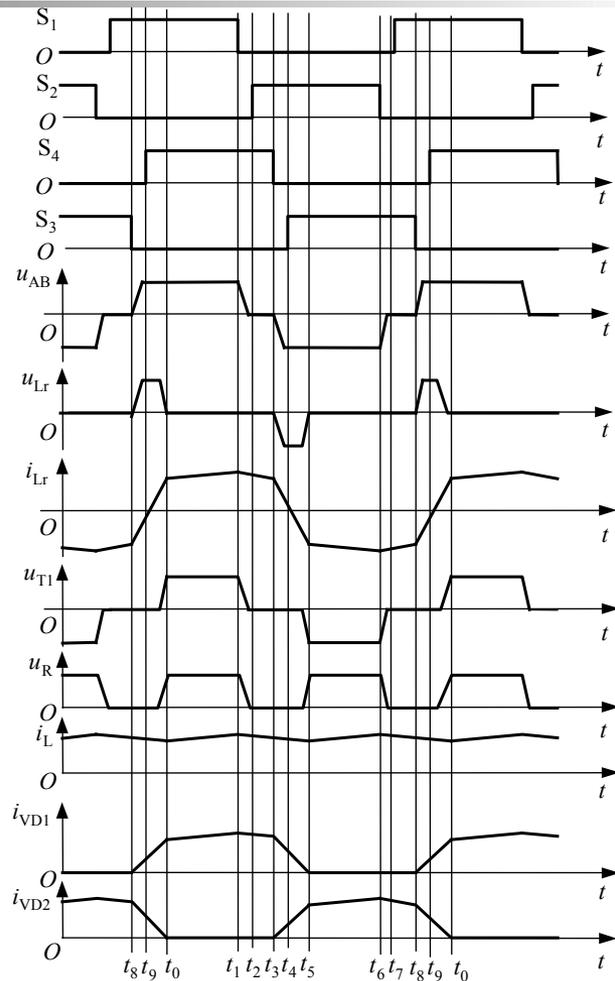


图 7-15 移相全桥电路的理想化波形

# 21.3.4 零电压转换 PWM 电路

- 零电压转换 PWM 电路具有电路简单、效率高等优点。

## 1) 工作过程:

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  $U_0$ ，电流  $i_{Lr}$  线性增长，  $VD$  中的电流以同样的速率下降。  $t_1$  时刻，  $i_{Lr} = I_L$ ，  $VD$  中电流下降到零，关断。

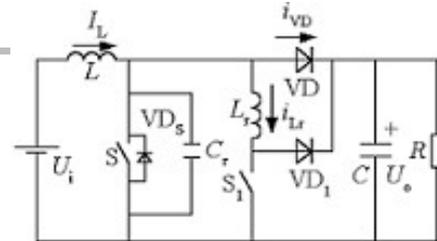


图 7-18 升压型零电压转换 PWM 电路的原理图

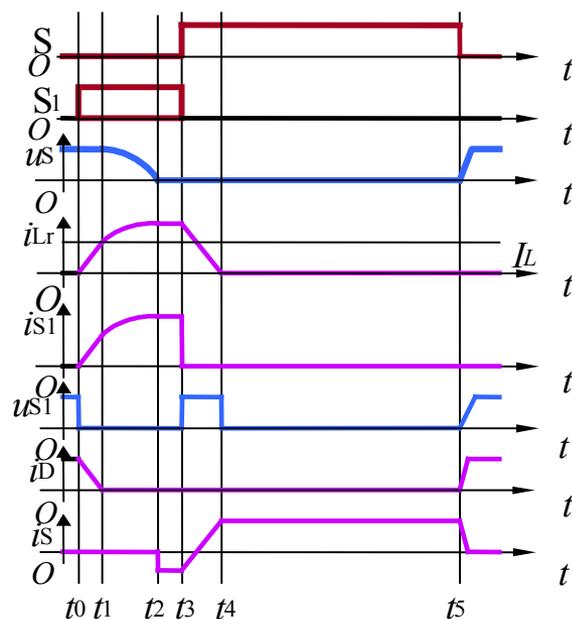


图 7-19 升压型零电压转换 PWM 电路的理想化波形

# 21.3.4 零电压转换 PWM 电路

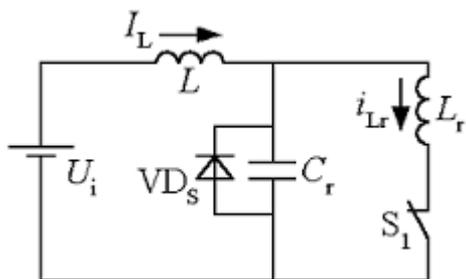


图 7-20 升压型零电压转换 PWM 电路在  $t_1 \sim t_2$  时段的等效电路

$t_1 \sim t_2$  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  $u_{C_r} = 0$ ， $VD_s$  导通， $u_{C_r}$  被箝位于零，而电流  $i_{L_r}$  保持不变。

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

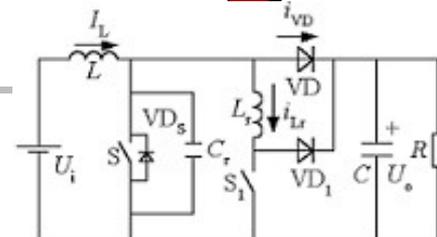


图 7-18 升压型零电压转换 PWM 电路的原理图

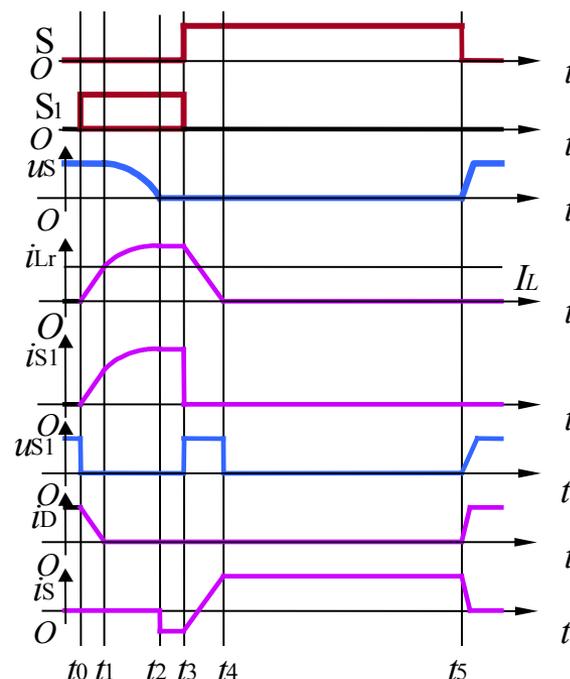


图 7-19 升压型零电压转换 PWM 电路的理想化波形

## 21.3.4 零电压转换 PWM 电路

- t<sub>3</sub>~t<sub>4</sub> 时段：** t<sub>3</sub> 时刻 S 开通时，为零电压开通。S 开通的同时 S<sub>1</sub> 关断，L<sub>r</sub> 中的能量通过 VD<sub>1</sub> 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<sub>4</sub> 时刻 i<sub>Lr</sub>=0，VD<sub>1</sub> 关断，主开关 S 中的电流 i<sub>S</sub>=I<sub>L</sub>，电路进入正常导通状态。
- t<sub>4</sub>~t<sub>5</sub> 时段：** t<sub>5</sub> 时刻 S 关断。C<sub>r</sub> 限制了 S 电压的上升率，降低了 S 的关断损耗。

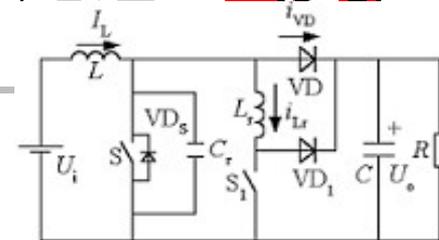


图 7-18 升压型零电压转换 PWM 电路的原理图

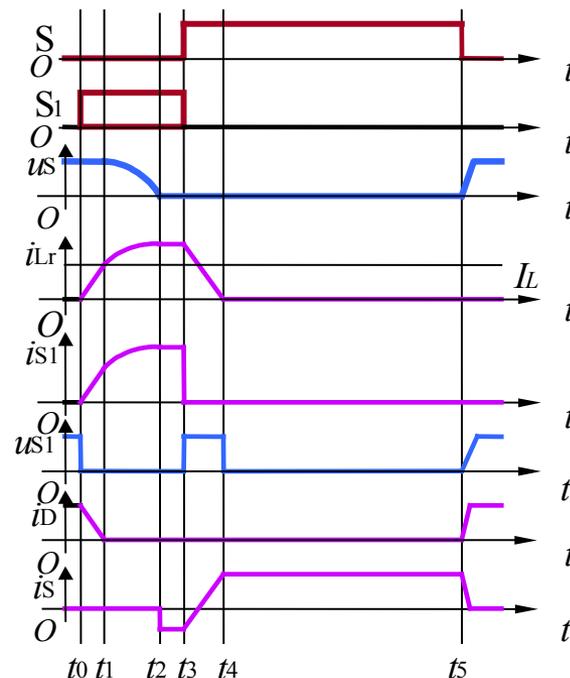


图 7-19 升压型零电压转换 PWM 电路的理想化波形