

# 第8章 软开关技术

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 软开关技术新进展

本章小结

# 引言

- 现代电力电子装置的发展趋势是小型化、轻量化，同时对装置的效率和电磁兼容性也提出了更高的要求。
- 电力电子电路的高频化
  - ◆ 可以减小滤波器、变压器的体积和重量，电力电子装置小型化、轻量化。
  - ◆ 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。
  - ◆ 使开关频率可以大幅度提高。

## 8.1 软开关的基本概念

### 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 硬开关与软开关

### ■ 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。
- ◆ 电压和电流变化的速度很快，波形出现了明显的过冲，从而产生了开关噪声。
- ◆ 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，但随着开关频率的提高，开关损耗就越来越显著。

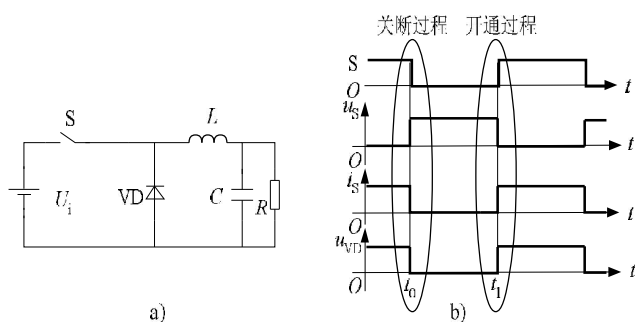


图8-1 硬开关降压型电路及波形

a) 电路图    b) 理想化波形

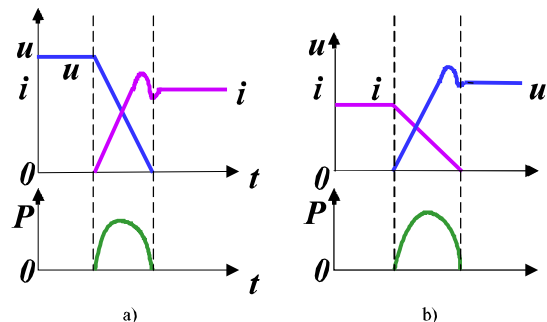


图8-2 硬开关过程中的电压和电流

a) 关断过程    b) 开通过程

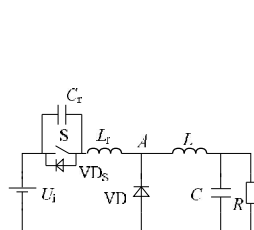


## 8.1.1 硬开关与软开关

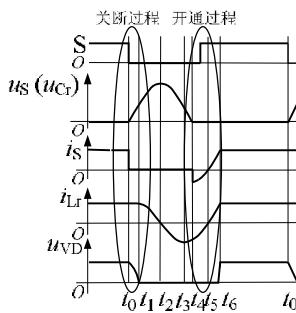
### ■ 软开关

◆ 软开关电路中增加了谐振电感 $L_r$ 和谐振电容 $C_r$ ，与滤波电感 $L$ 、电容 $C$ 相比， $L_r$ 和 $C_r$ 的值小得多，同时开关 $S$ 增加了反并联二极管 $VD_S$ ，而硬开关电路中不需要这个二极管。

◆ 降压型零电压开关准谐振电路中，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，同时，谐振过程限值了开关过程中电压和电流的变化率，这使得开关噪声也显著减小。



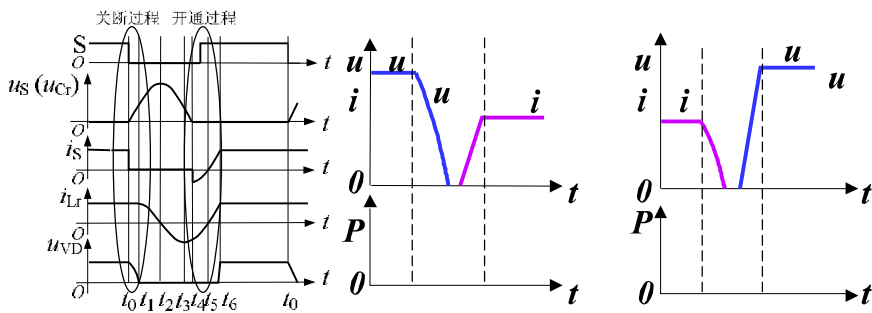
a)



b)

图8-3 降压型零电压开关准谐振电路及波形

a) 电路图    b) 理想化波形



a)

b)

图8-4 软开关过程中的电压和电流

a) 关断过程    b) 开通过程

## 8.1.2 零电压开关与零电流开关

### ■ 零电压开通

◆ 开关开通前其两端电压为零，则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，则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。

■ 在很多情况下，不再指出开通或关断，仅称零电压开关和零电流开关。



## 8.2 软开关电路的分类

### ■ 软开关电路的分类

◆ 根据电路中主要的开关元件是零电压开通还是零电流关断，可以将软开关电路分成**零电压电路**和**零电流电路**两大类，个别电路中，有些开关是零电压开通的，另一些开关是零电流关断的。

◆ 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**。



## 8.2 软开关电路的分类

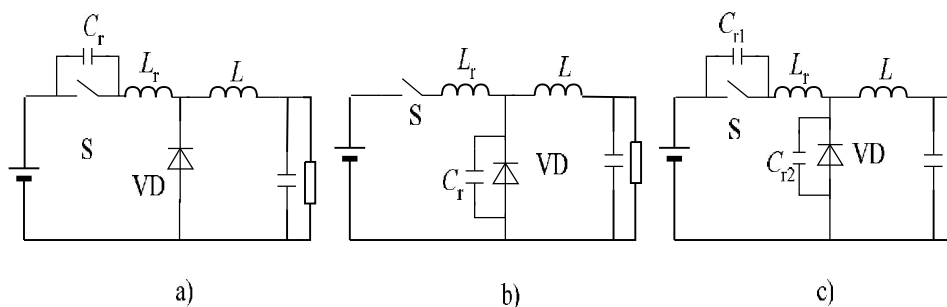


图 8-5 准谐振电路

a) 零电压开关准谐振电路   b) 零电流开关准谐振电路   c) 零电压开关多谐振电路

### ■ 准谐振电路

#### ◆ 分类

- ➡ 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)
- ➡ 零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 (Resonant DC Link)



## 8.2 软开关电路的分类

- ◆ 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**。
- ◆ 开关损耗和开关噪声都大大下降，也有一些负面问题
  - 👉 谐振**电压峰值**很高，要求器件耐压必须提高。
  - 👉 谐振**电流的有效值**很大，电路中存在大量的**无功功率的交换**，造成电路导通损耗加大。
  - 👉 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，变频的开关频率给电路设计带来困难。

## 8.2 软开关电路的分类

### ■ 零开关PWM电路

◆ 电路中引入了**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。

#### ◆ 分类

👉 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）

◆ 同准谐振电路相比，这类电路有很多明显的优势：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**。

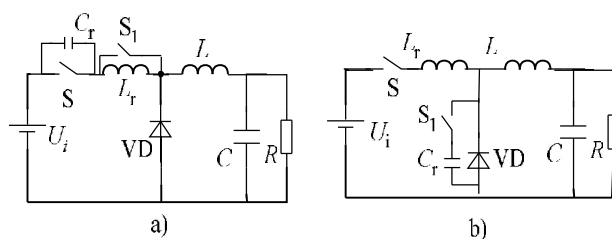


图8-6 零开关PWM电路

a) 零电压开关PWM电路    b) 零电流开关PWM电路

## 8.2 软开关电路的分类

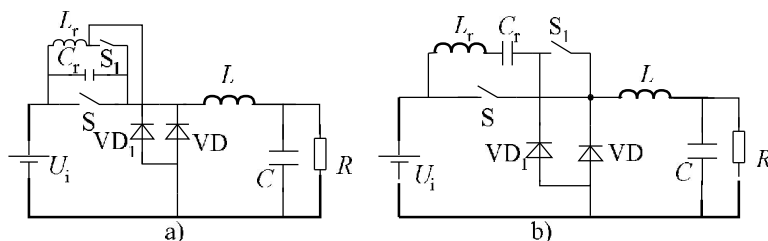


图 8-7 零转换PWM电路的基本开关单元

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

### ■ 零转换PWM电路

◆ 电路中采用**辅助开关**控制谐振的开始时刻，所不同的是，谐振电路是与主开关**并联**的，因此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，而且电路中**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。

#### ◆ 分类

👉 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）

## 8.3 典型的软开关电路

### 8.3.1 零电压开关准谐振电路

### 8.3.2 谐振直流环

### 8.3.3 移相全桥型零电压开关PWM电路

### 8.3.4 零电压转换PWM电路



### 8.3.1 零电压开关准谐振电路

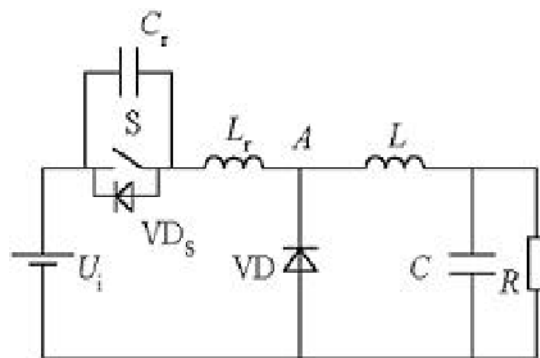


图8-8 零电压开关  
准谐振电路原理图

#### ■ 零电压开关准谐振电路

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

◆ 开关电路的工作过程是按开关周期重复的，在分析时可以选择开关周期中任意时刻为分析的起点，选择合适的起点，可以使分析得到简化。



## 8.3.1 零电压开关准谐振电路

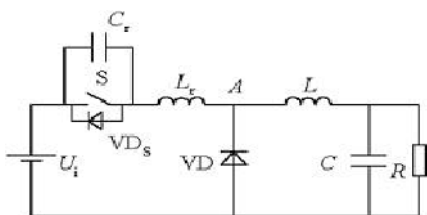


图8-8 零电压开关准谐振电路原理图

### ◆工作过程

☞ 选择开关 **S** 的关断时刻为分析的起点。

☞  $t_0 \sim t_1$  时段：  $t_0$  之前， **S** 导通， **VD** 为断态，  $u_{Cr}=0$ ，  $i_{Lr}=I_L$ ，  $t_0$  时刻 **S** 关断，  $C_r$  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， 电路可以等效为图8-10；  $L_r+L$  向  $C_r$  充电，  $L$  等效为电流源，  $u_{Cr}$  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

$$\frac{d u_{Cr}}{d t} = \frac{I_L}{C_r} \quad (8-1)$$

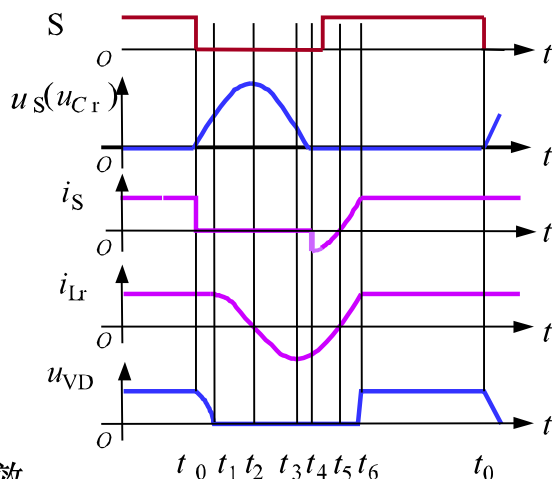


图8-9 零电压开关准谐振电路的理想化波形

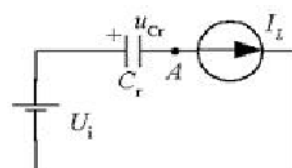


图8-10 零电压开关准谐振电路在  $t_0 \sim t_1$  时段等效电路

## 8.3.1 零电压开关准谐振电路

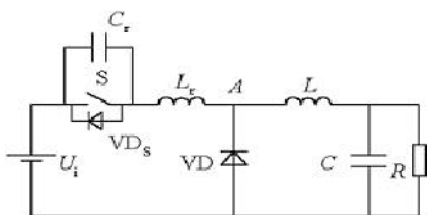


图8-8 零电压开关准谐振电路原理图

👉  $t_1 \sim t_2$  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，如图8-11所示；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。

👉  $t_2 \sim t_3$  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。

👉  $t_3 \sim t_4$  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  $u_{Cr} = 0$ 。

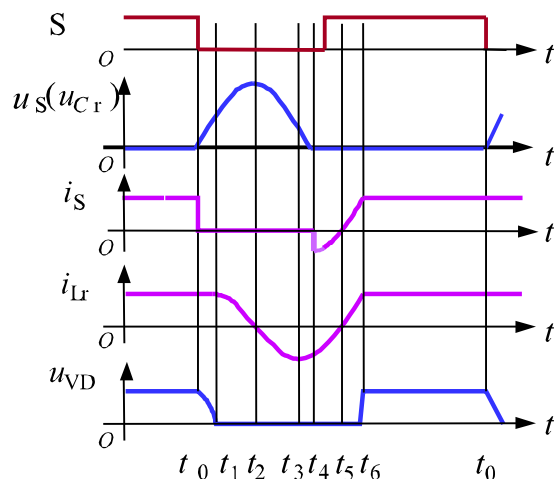


图8-9 零电压开关准谐振电路的理想化波形

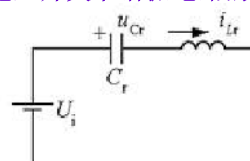


图8-11 零电压开关准谐振电路在  $t_1 \sim t_2$  时段等效电路

## 8.3.1 零电压开关准谐振电路

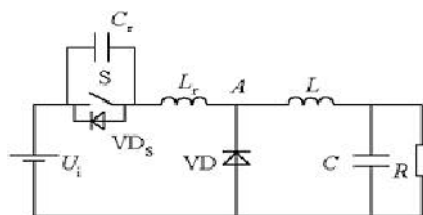


图8-8 零电压开关准谐振电路原理图

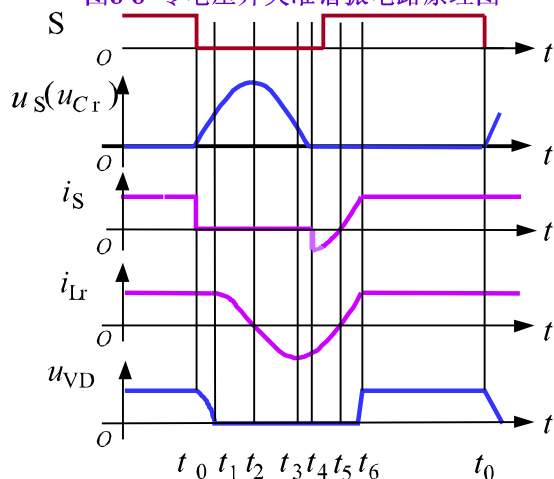


图8-9 零电压开关准谐振电路的理想化波形

👉  $t_1$  到  $t_4$  时段电路谐振过程的方程为

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

$$C_r \frac{du_{C_r}}{dt} = i_{L_r} \quad (8-2)$$

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

👉  $t_4 \sim t_5$  时段：\$u\_{C\_r}\$ 被箝位于零，\$u\_{L\_r} = U\_i\$，\$i\_{L\_r}\$ 线性衰减，直到  $t_5$  时刻，\$i\_{L\_r} = 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**。

👉  $t_5 \sim t_6$  时段：S 为通态，\$i\_{L\_r}\$ 线性上升，直到  $t_6$  时刻，\$i\_{L\_r} = I\_L\$，VD 关断。

👉  $t_4$  到  $t_6$  时段电流  $i_{L_r}$  的变化率为

$$\frac{di_{L_r}}{dt} = \frac{U_i}{L_r} \quad (8-3)$$

👉  $t_6 \sim t_0$  时段：S 为通态，VD 为断态。



## 8.3.1 零电压开关准谐振电路

◆ 谐振过程是软开关电路工作过程中最重要的部分，谐振过程中的基本数量关系为

👉  $u_{Cr}$ （即开关S的电压 $u_s$ ）的表达式

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

👉  $[t_1, t_4]$ 上的最大值即 $u_{Cr}$ 的谐振峰值，就是开关S承受的峰值电压，表达式为

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

👉 零电压开关准谐振电路实现软开关的条件

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

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。

◆ 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，这增加了电路的成本，降低了可靠性。

## 8.3.2 谐振直流环

### ■ 谐振直流环

◆ 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。

◆ 图8-12中，辅助开关S使逆变桥中所有的开关工作在零电压开通的条件下，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。

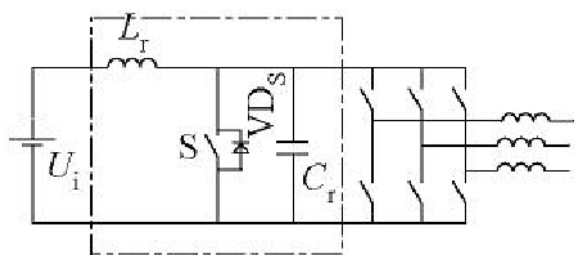


图8-12 谐振直流环电路原理图

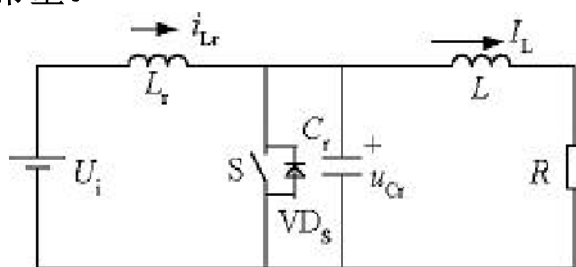


图8-13 谐振直流环电路的等效电路



## 8.3.2 谐振直流环

### ◆ 工作过程

☞ 以开关S关断时刻为起点。

☞  $t_0 \sim t_1$  时段:  $t_0$  之前,  $i_{Lr}$  大于  $I_L$ , S 导通,  $t_0$  时刻 S 关断, 电路中发生谐振, 因为  $i_{Lr} > I_L$ , 因此  $i_{Lr}$  对  $C_r$  充电,  $u_{Cr}$  不断升高, 直到  $t_1$  时刻,  $u_{Cr} = U_i$ 。

☞  $t_1 \sim t_2$  时段:  $t_1$  时刻由于  $u_{Cr} = U_i$ ,  $U_{Lr} = 0$ , 因此谐振电流  $i_{Lr}$  达到峰值,  $t_1$  以后,  $i_{Lr}$  继续向  $C_r$  充电并不断减小, 而  $u_{Cr}$  进一步升高, 直到  $t_2$  时刻  $i_{Lr} = I_L$ ,  $u_{Cr}$  达到谐振峰值。

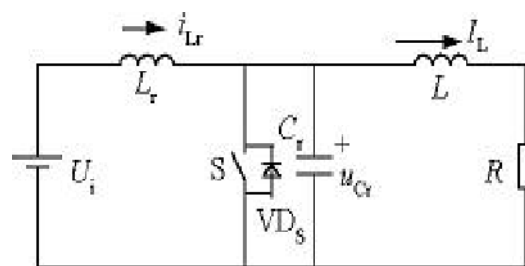


图8-13 谐振直流环电路的等效电路

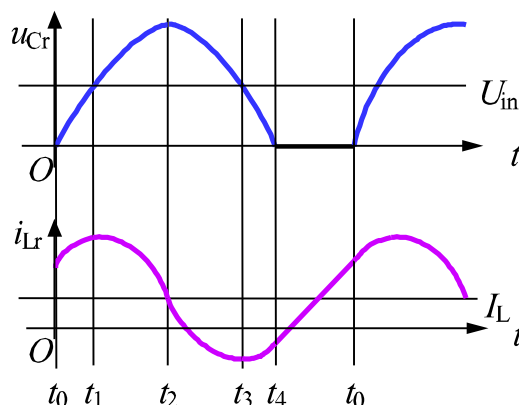


图8-14 谐振直流环电路的理想化波形

## 8.3.2 谐振直流环

👉  $t_2 \sim t_3$  时段:  $t_2$  以后,  $u_{Cr}$  向  $L_r$  和  $I_L$  放电,  $i_{Lr}$  继续降低, 到零后反向,  $C_r$  继续向  $L_r$  放电,  $i_{Lr}$  反向增加, 直到  $t_3$  时刻  $u_{Cr} = U_i$ 。

👉  $t_3 \sim t_4$  时段:  $t_3$  时刻,  $u_{Cr} = U_i$ ,  $i_{Lr}$  达到反向谐振峰值, 然后  $i_{Lr}$  开始衰减,  $u_{Cr}$  继续下降, 直到  $t_4$  时刻,  $u_{Cr} = 0$ ,  $VD_S$  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。

◆ 谐振直流环电路中电压  $u_{Cr}$  的谐振峰值很高, 增加了对开关器件耐压的要求。

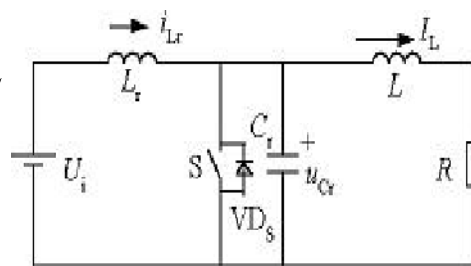


图8-13 谐振直流环电路的等效电路

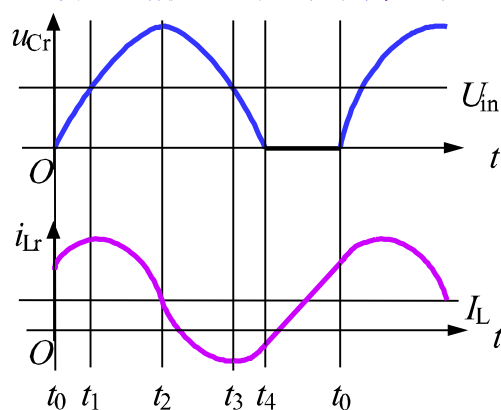


图8-14 谐振直流环电路的理想化波形

### 8.3.3 移相全桥型零电压开关PWM电路

#### ■ 移相全桥型零电压开关PWM电路

◆ 电路简单，仅仅增加了一个**谐振电感**，就使电路中四个开关器件都在零电压的条件下开通。

#### ◆ 控制方式的特点

☞ 在一个开关周期 $T_s$ 内，每一个开关导通的时间都**略小于 $T_s/2$** ，而关断的时间都**略大于 $T_s/2$** 。

☞ 同一个半桥中上下两个开关不同时处于通态，每一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**。

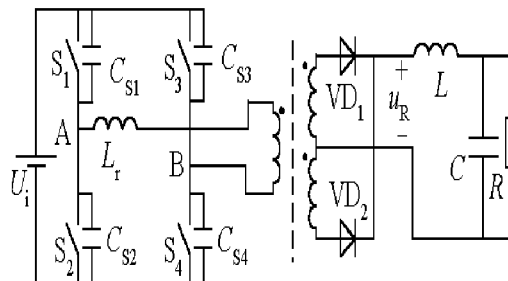


图8-15 移相全桥零电压开关PWM电路



### 8.3.3 移相全桥型零电压开关PWM电路

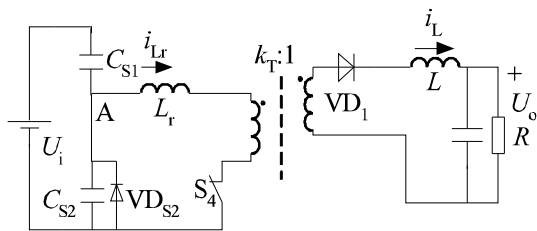


图8-17 移相全桥电路在 $t_1 \sim t_2$ 阶段的等效电路图

#### ◆工作过程

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

☞  $t_1 \sim t_2$ 时段： $t_1$ 时刻 $S_1$ 关断后， $C_1$ 、 $C_2$ 与 $L_r$ 、 $L$ 构成谐振回路，如图8-17所示，谐振开始时  $u_A(t_1) = U_i$ ，在谐振过程中， $u_A$ 不断下降，直到 $u_A = 0$ ， $VD_{S2}$ 导通， $i_{Lr}$ 通过 $VD_{S2}$ 续流。

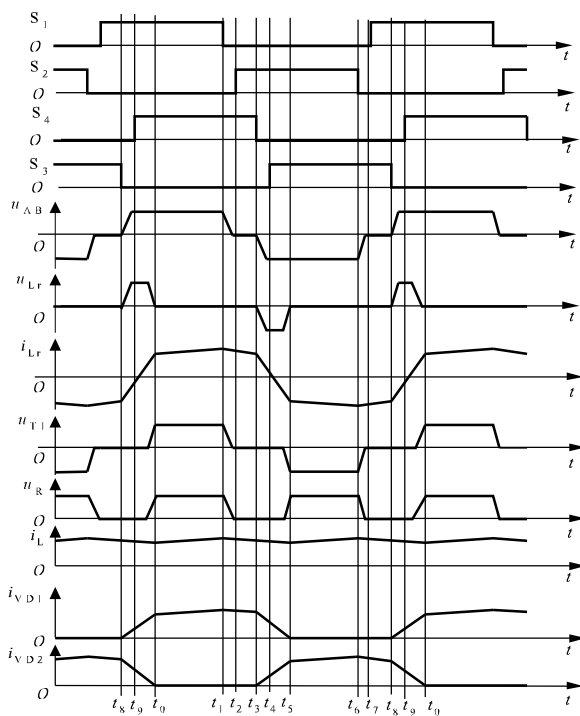


图8-16 移相全桥电路的理想化波形

### 8.3.3 移相全桥型零电压开关PWM电路

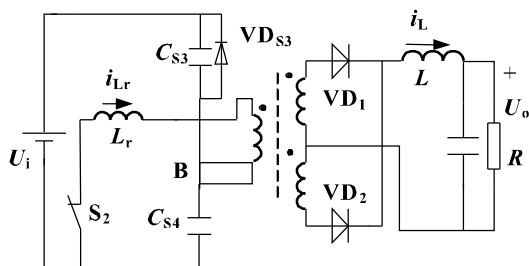


图8-18 移相全桥电路在 $t_3 \sim t_4$ 阶段的等效电路

在 $t_2 \sim t_3$ 时段： $t_2$ 时刻 $S_2$ 开通，由于 $VD_{S2}$ 导通，因此 $S_2$ 开通时电压为零，开通过程中不会产生开关损耗， $S_2$ 开通后，电路状态也不会改变，继续保持到 $t_3$ 时刻 $S_4$ 关断。

在 $t_3 \sim t_4$ 时段： $t_4$ 时刻开关 $S_4$ 关断后，电路的状态变为图8-18所示，这时 $C_3$ 、 $C_4$ 与 $L_r$ 构成谐振回路，谐振过程中 $i_{Lr}$ 不断减小，B点电压不断上升，直到 $VD_{S3}$ 导通；这种状态维持到 $t_4$ 时刻 $S_3$ 开通， $S_3$ 开通时 $VD_{S3}$ 导通，因此 $S_3$ 是在零电压的条件下开通，开通损耗为零。

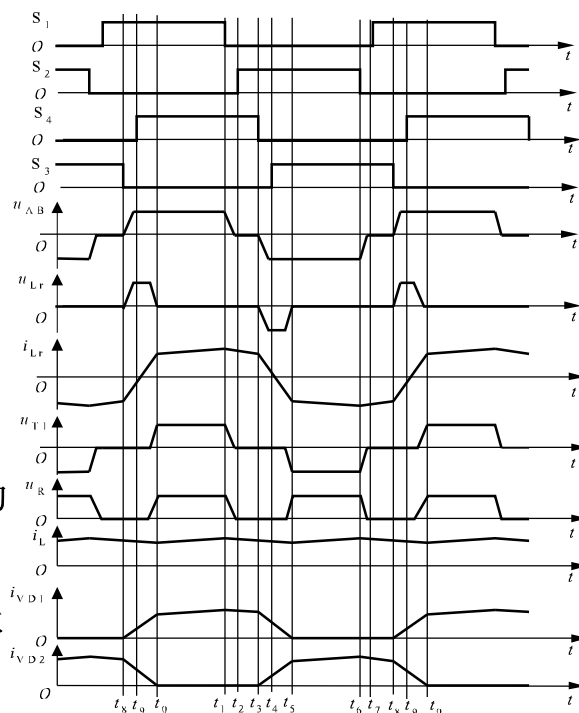


图8-16 移相全桥电路的理想化波形

### 8.3.3 移相全桥型零电压开关PWM电路

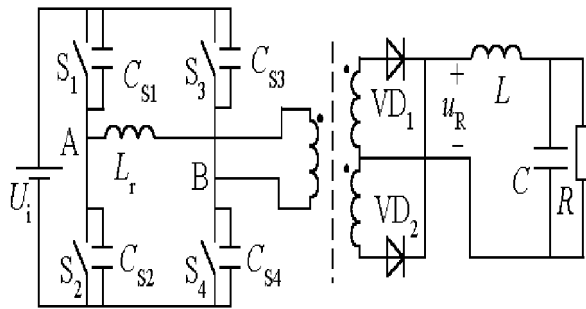


图8-15 移相全桥零电压开关PWM电路

👉  $t_4 \sim t_5$  时段:  $S_3$  开通后,  $i_{Lr}$  继续减小, 下降到零后反向, 再不断增大, 直到  $t_5$  时刻  $i_{Lr} = I_L/kT$ ,  $i_{VD1}$  下降到零而关断, 电流  $i_L$  全部转移到  $VD_2$  中。

👉  $t_0 \sim t_5$  时段正好是开关周期的一半, 而在另一半开关周期  $t_5 \sim t_0$  时段中, 电路的工作过程与  $t_0 \sim t_5$  时段完全对称。

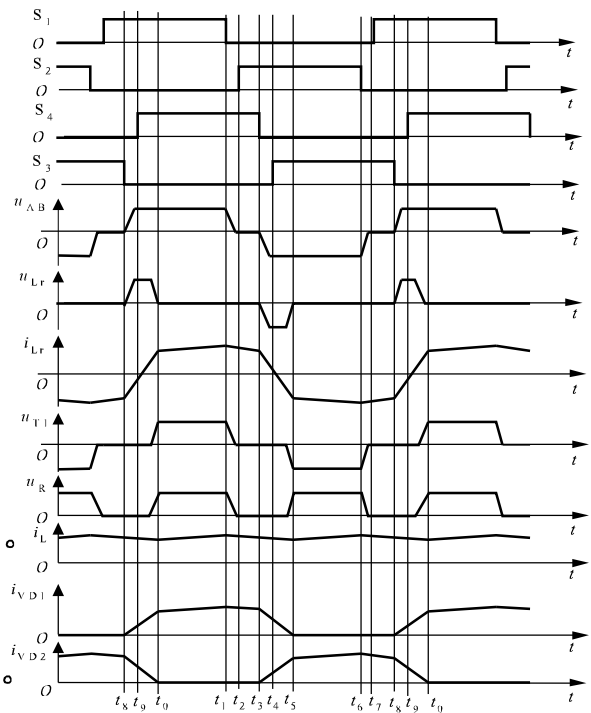


图8-16 移相全桥电路的理想化波形



## 8.3.4 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，广泛用于功率因数校正电路（PFC）、DC-DC变换器、斩波器等。

◆ 以升压电路为例，在分析中假设电感 $L$ 、电容 $C$ 很大，可以忽略电流和输出电压的波动，在分析中还忽略元件与线路中的损耗。

◆ 在零电压转换PWM电路中，辅助开关 $S_1$ 超前于主开关 $S$ 开通，而 $S$ 开通后 $S_1$ 就关断了，主要的谐振过程都集中在 $S$ 开通前后。

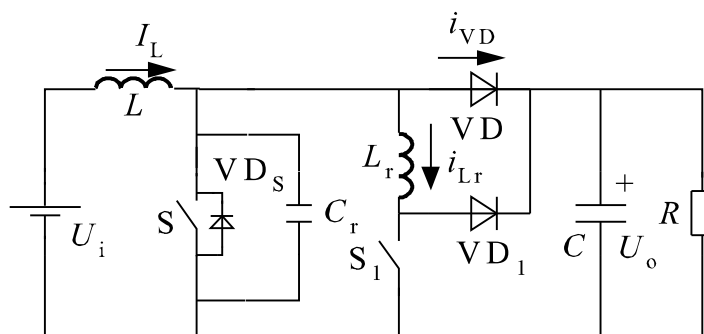


图8-19 升压型零电压转换PWM电路的原理图



## 8.3.4 零电压转换PWM电路

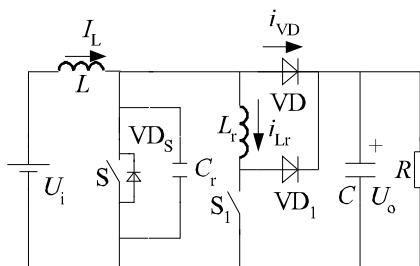


图8-19 升压型零电压转换PWM电路的原理图

### ◆工作过程

👉  $t_0 \sim t_1$  时段：辅助开关先于主开关开通，由于此时VD尚处于通态，所以  $u_{Lr} = U_o$ ， $i_{Lr}$  按线性迅速增长， $i_{VD}$  以同样的速率下降，直到  $t_1$  时刻， $i_{Lr} = I_L$ ， $i_{VD}$  下降到零，二极管自然关断。

👉  $t_1 \sim t_2$  时段：此时电路可以等效为图8-21， $L_r$  与  $C_r$  构成谐振回路，由于  $L$  很大，谐振过程中其电流基本不变，对谐振影响很小，可以忽略；谐振过程中  $i_{Lr}$  增加而  $u_{Cr}$  下降， $t_2$  时刻  $u_{Cr}$  降到零，VD<sub>S</sub> 导通， $u_{Cr}$  被箝位于零，而  $i_{Lr}$  保持不变。

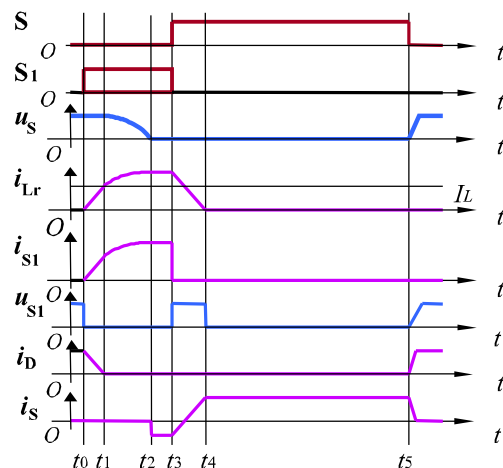


图8-20 升压型零电压转换PWM电路的理想化波形

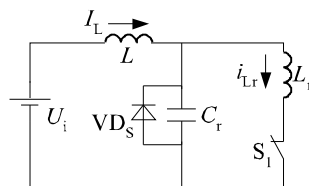


图 8-21 升压型零电压转换PWM电路在  $t_1 \sim t_2$  时段的等效电路

## 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  $i_{Lr}$  保持不变, 这种状态一直保持到  $t_3$  时刻  $S$  开通、 $S_1$  关断。

👉  $t_3 \sim t_4$  时段:  $t_3$  时刻  $S$  开通时,  $u_s$  为零, 因此没有开关损耗,  $S$  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,  $u_{Lr}$  下降, 而  $i_s$  线性上升, 到  $t_4$  时刻  $i_{Lr} = 0$ ,  $VD_1$  关断,  $i_s = I_L$ , 电路进入正常导通状态。

👉  $t_4 \sim t_5$  时段:  $t_5$  时刻  $S$  关断, 由于  $C_r$  的存在,  $S$  关断时的电压上升率受到限制, 降低了  $S$  的关断损耗。

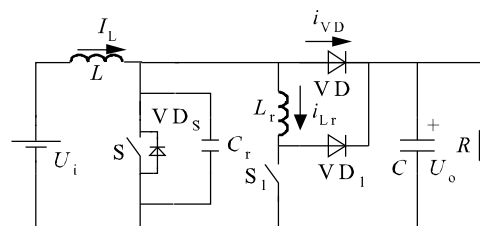


图8-19 升压型零电压转换PWM电路的原理图

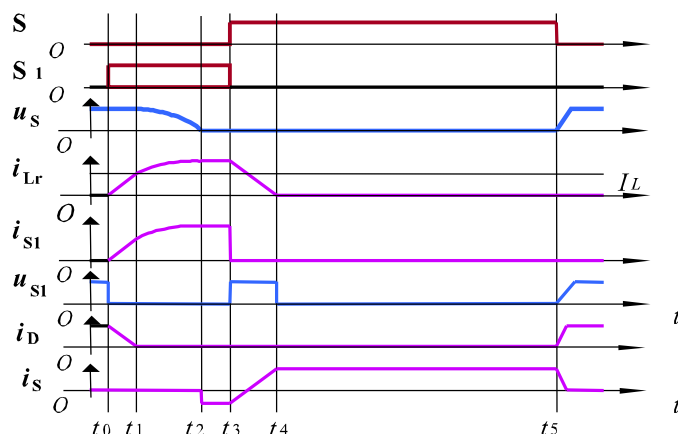


图8-20 升压型零电压转换PWM电路的理想化波形

## 8.4 软开关技术新进展

■ 软开关技术出现了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。



# 本章小结

■本章的重点为：

- ◆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。

