第8章 软开关技术

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。

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

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。

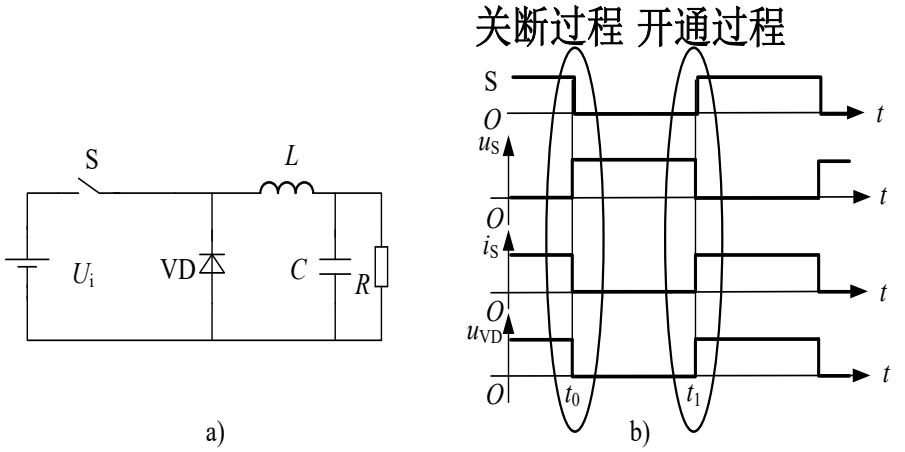


图8-1 硬开关降压型电路及波形
a）电路图 b）理想化波形

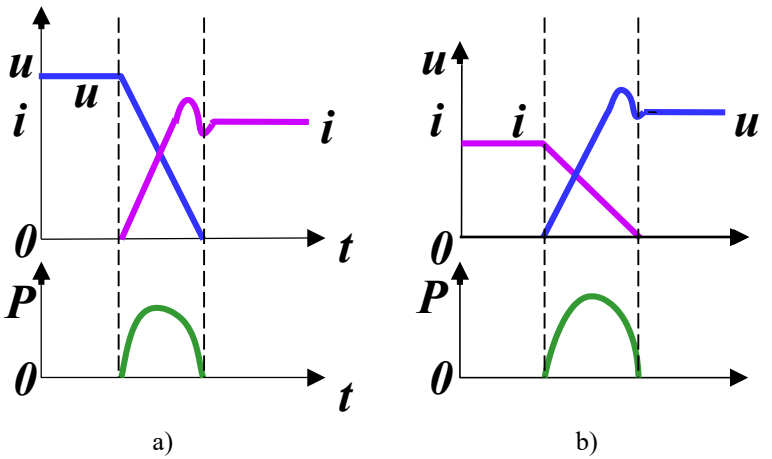


图8-2 硬开关过程中的电压和电流
a) 关断过程 b)开通过程

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。

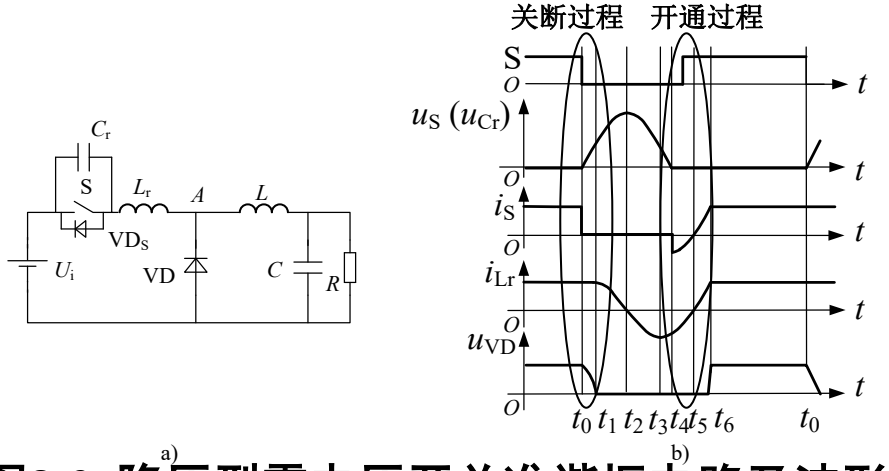


图8-3 降压型零电压开关准谐振电路及波形
a）电路图 b）理想化波形

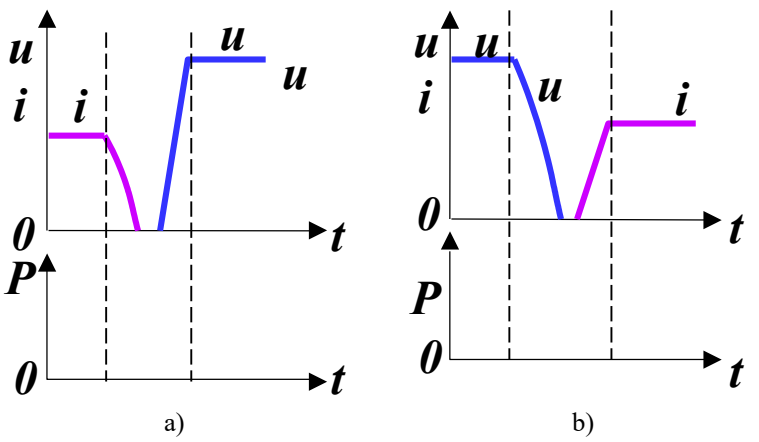


图8-4 软开关过程中的电压和电流
a) 关断过程 b)开通过程

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

8.2.1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）

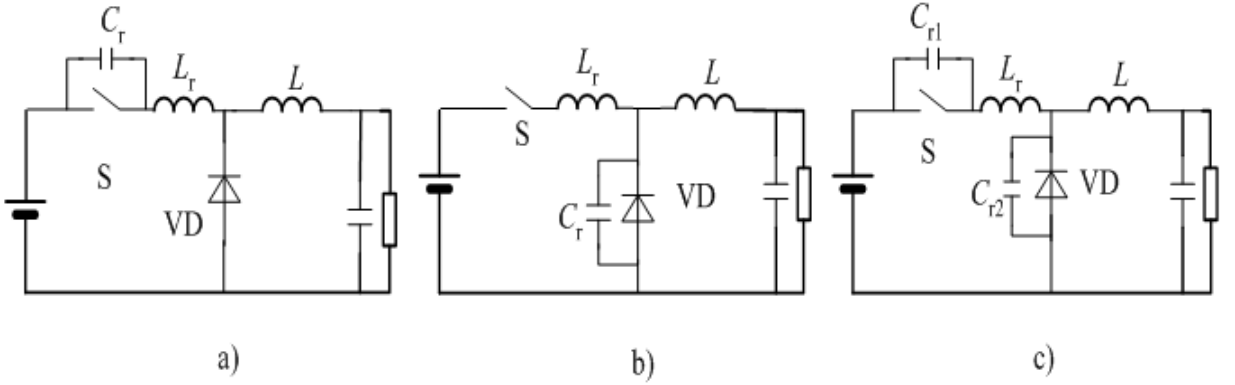


图 **8-5** 准谐振电路

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

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

8.2.2 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）

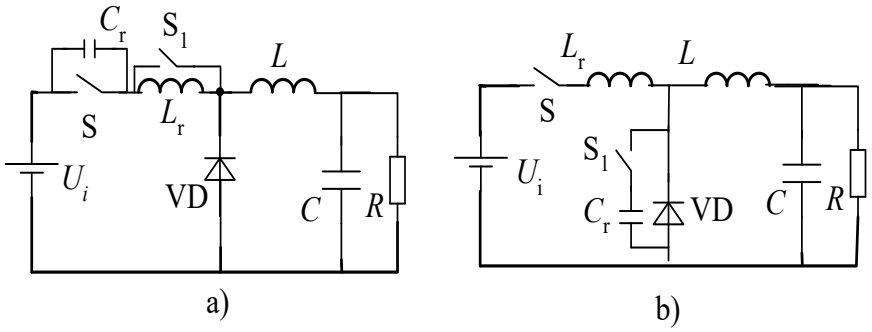


图8-6 零开关PWM电路

a）零电压开关PWM电路　　b）零电流开关PWM电路

- 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。

8.2 软开关电路的分类

8.2.3零转换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）

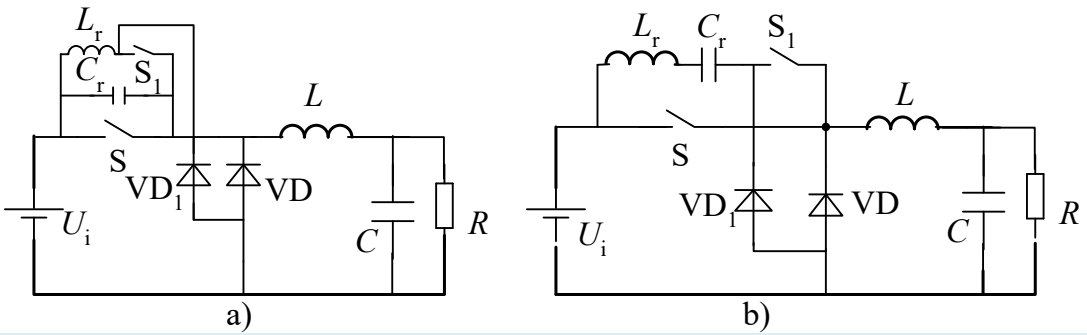


图 8-7 零转换PWM电路的基本开关单元

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

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

□ 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。

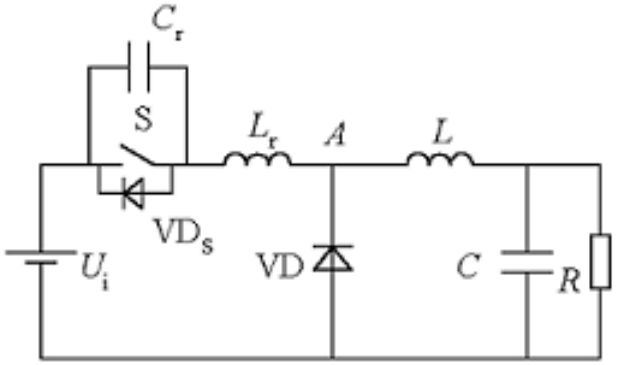


图8-8 零电压开关准谐振电路原理图

◆工作过程

- ➢ 选择开关***S*的关断时刻**为分析的起点。
- ➢ t_0~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；**

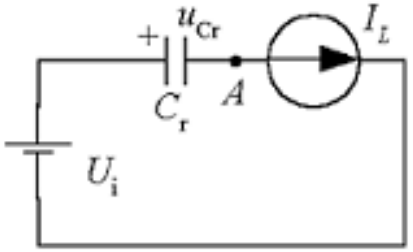


图8-10 零电压开关准谐振电路在t_0~t_1时段等效电路

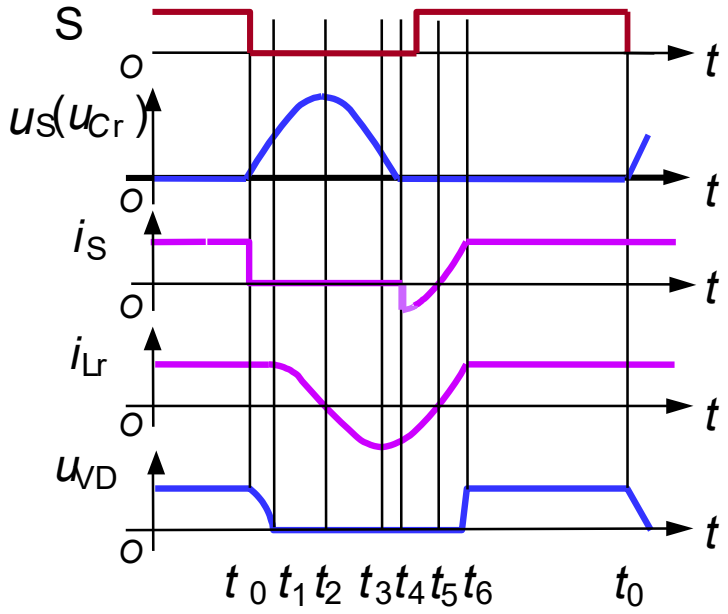


图8-9 零电压开关准谐振电路的理想化波形

8.3.1 零电压开关准谐振电路

- 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

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

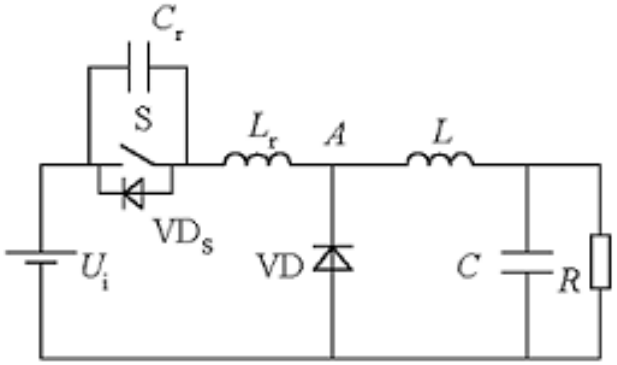


图8-8 零电压开关准谐振电路原理图

- t_1~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~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~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。

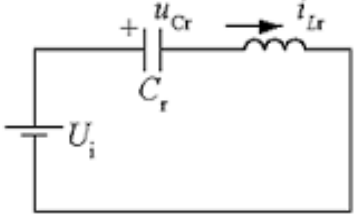
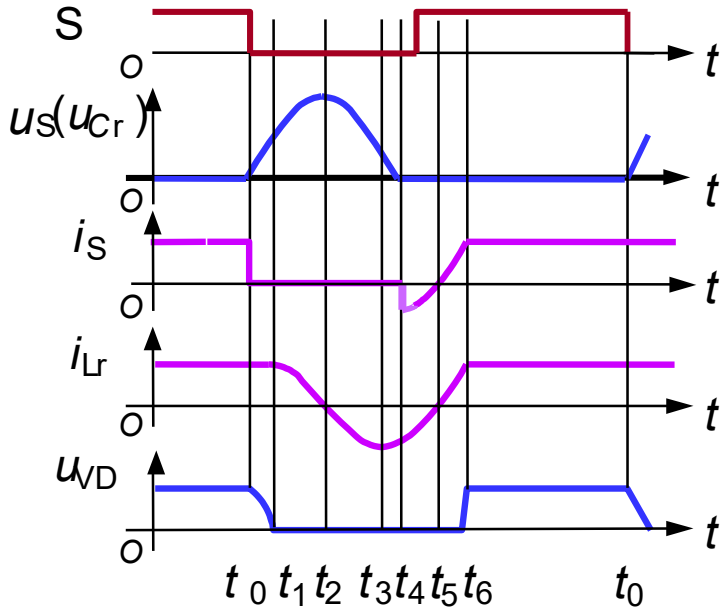


图8-11 零电压开关准谐振电路在t_1~t_4时段等效电路



8-9 零电压开关准谐振电路的理想化波形

8.3.1 零电压开关准谐振电路

- t_1到t_4时段电路谐振过程的方程为

$$L_r \frac{\mathrm{d}i_{Lr}}{\mathrm{d}t} + u_{Cr} = U_i$$

$$C_r \frac{\mathrm{d}u_{Cr}}{\mathrm{d}t} = i_{Lr} \qquad \textbf{(8-2)}$$

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

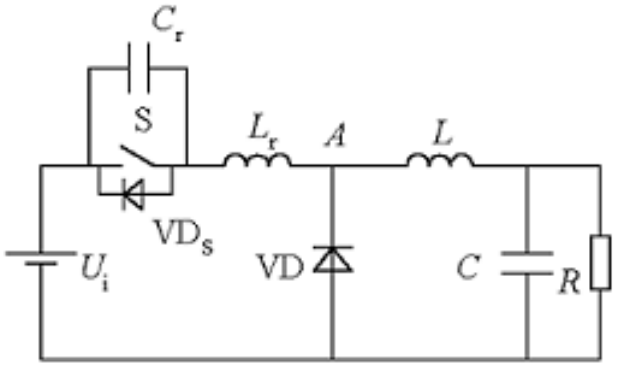


图8-8 零电压开关准谐振电路原理图

- t_4~t_5时段：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**必须在这一时段使开关S开通**，才不会产生**开通损耗**。
- t_5~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。
- 到t_6时段电流i_{Lr}的变化率为

$$\frac{\mathrm{d}i_{Lr}}{\mathrm{d}t} = \frac{U_i}{L_r} \qquad \textbf{(8-3)}$$

- t_6~t_0时段：S为通态，VD为断态。

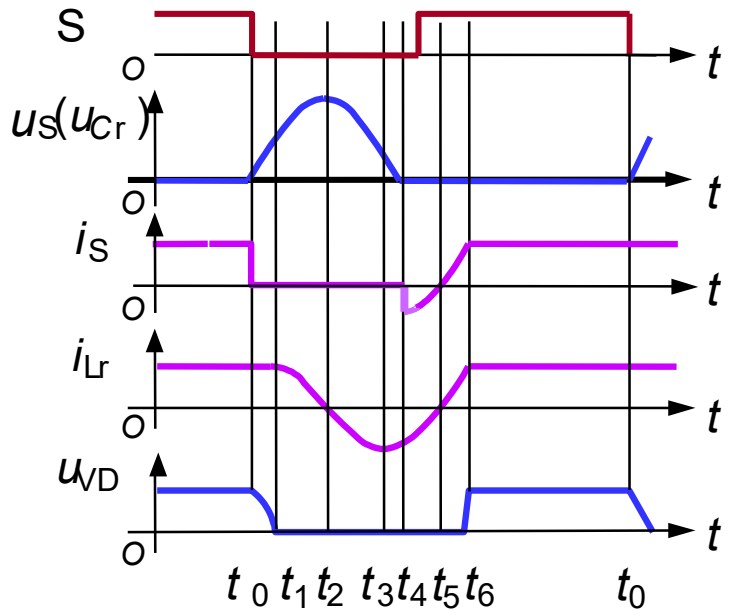


图8-9 零电压开关准谐振电路的理想化波形

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

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

➢ $[t_1,t_4]$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的开关动作用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。

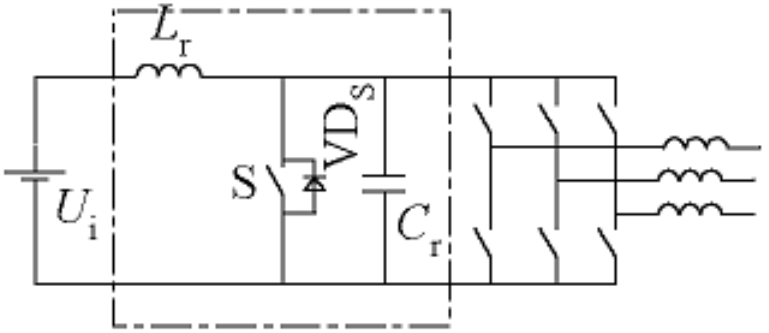


图8-12 谐振直流环电路原理图

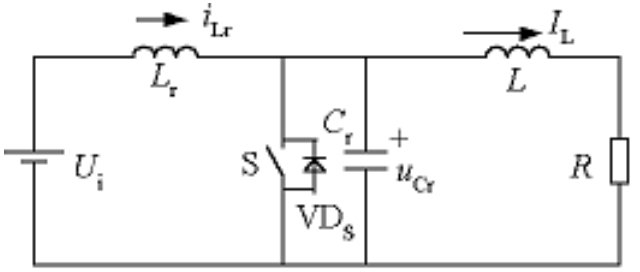


图8-13 谐振直流环电路的等效电路

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~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~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**。

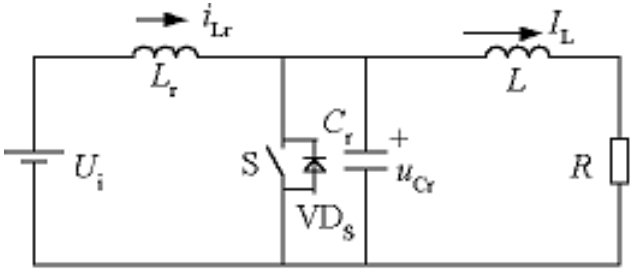


图8-13 谐振直流环电路的等效电路

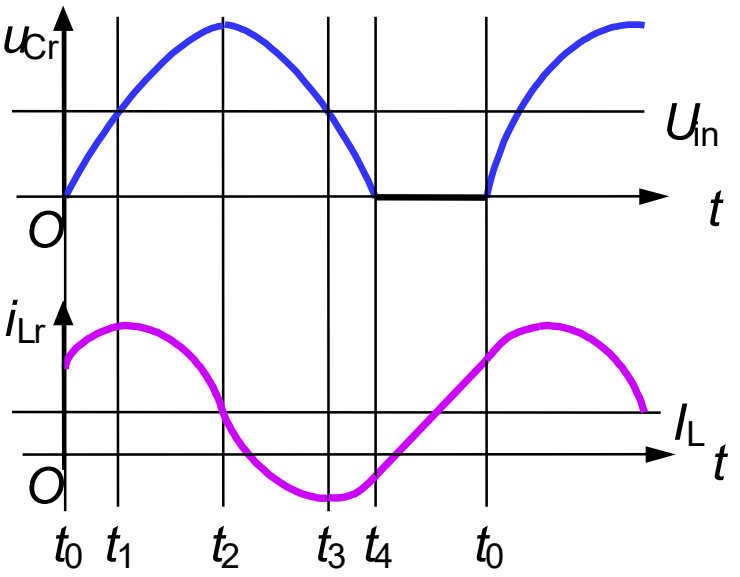


图8-14 谐振直流环电路的理想化波形

8.3.2 谐振直流环

- t_2~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~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~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。

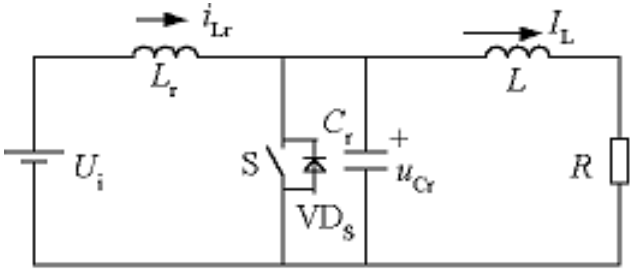


图8-13 谐振直流环电路的等效电路

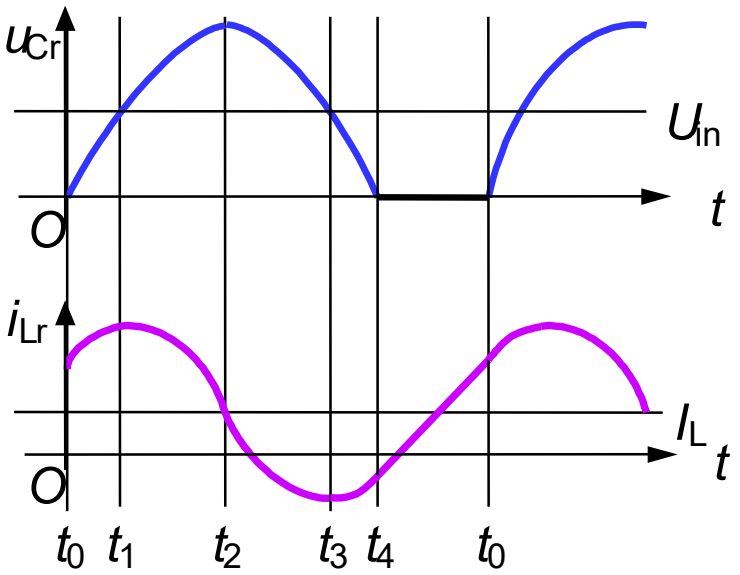


图8-14 谐振直流环电路的理想化波形

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。

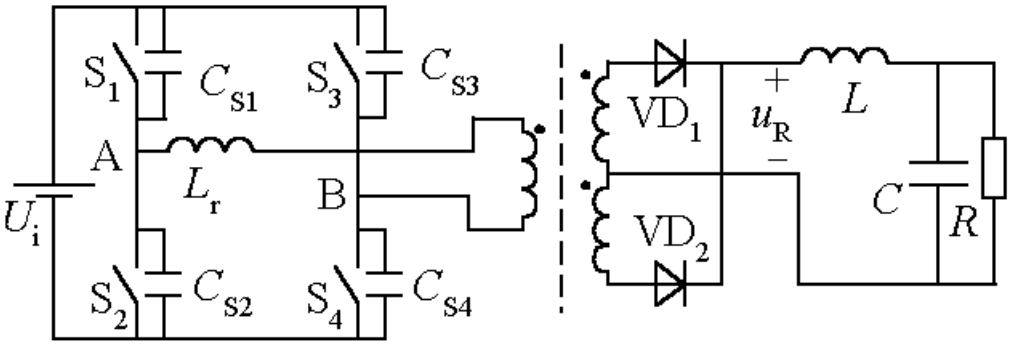


图8-15 移相全桥零电压开关PWM电路

8.3.3 移相全桥型零电压开关PWM电路

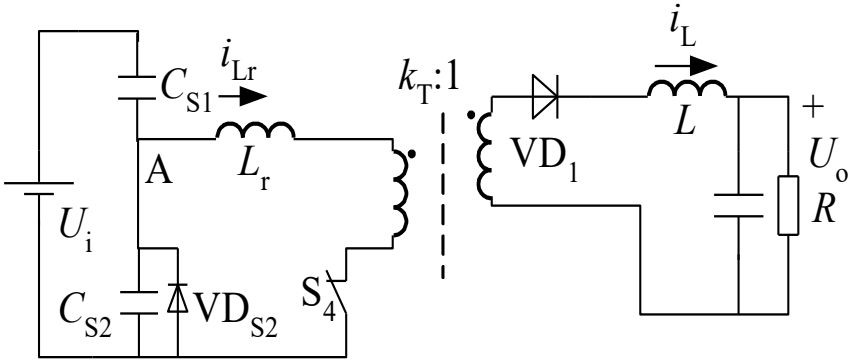
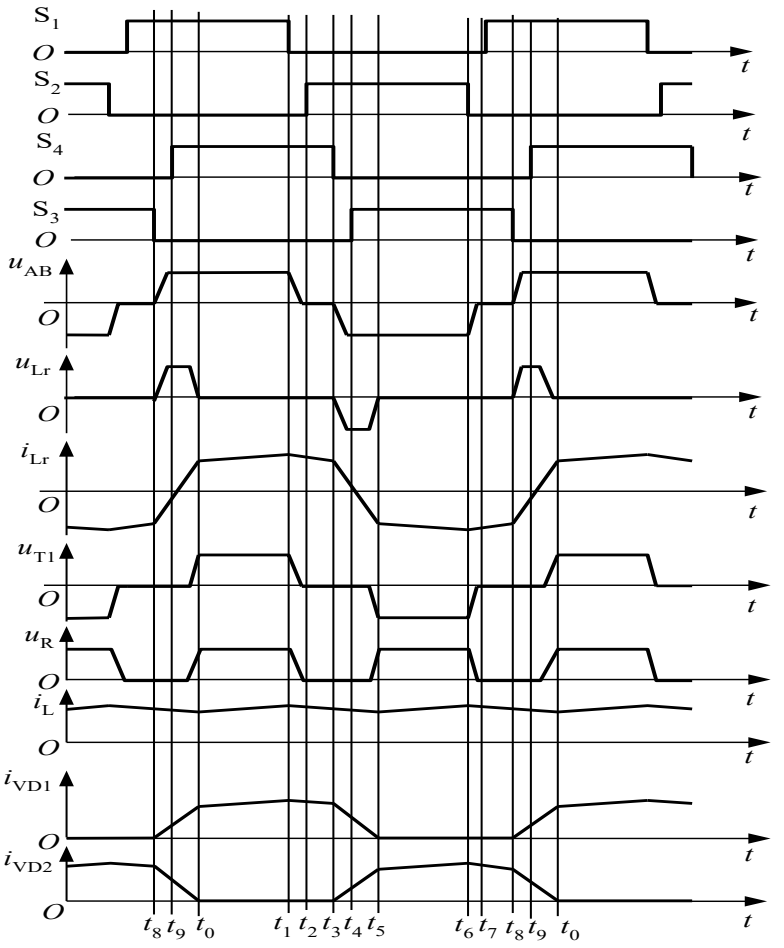


图8-17 移相全桥电路在t1~t2阶段的等效电路图



◆工作过程

- t_0~t_1时段：S_1与S_4都导通，直到t_1时刻S_1关断。
- t_1~t_2时段：t_1时刻S_1关断后，C_{s1}、C_{s2}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。

8.3.3 移相全桥型零电压开关PWM电路

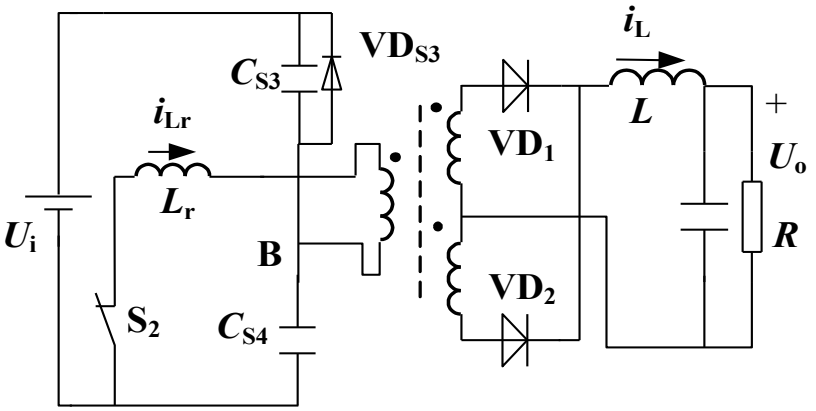
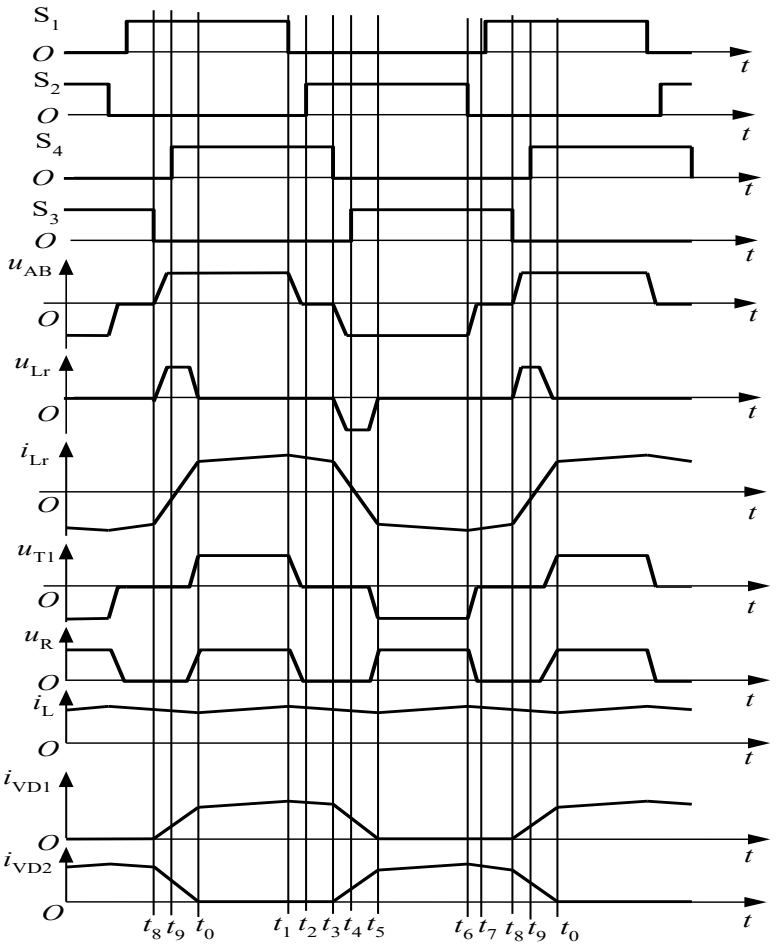


图8-18 移相全桥电路在t3~t4阶段的等效电路



- t_2~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。
- t_3~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_{s3}、C_{s4}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**。

8.3.3 移相全桥型零电压开关PWM电路

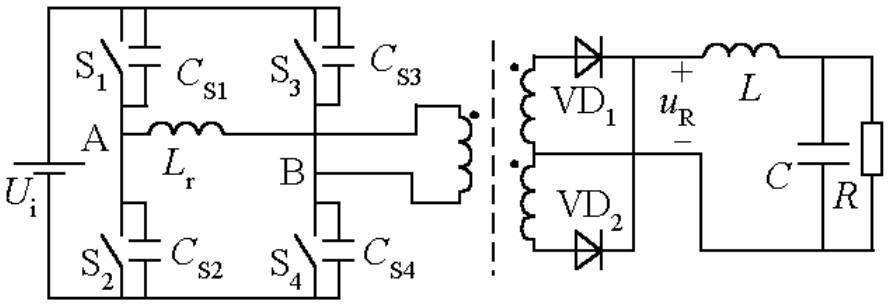
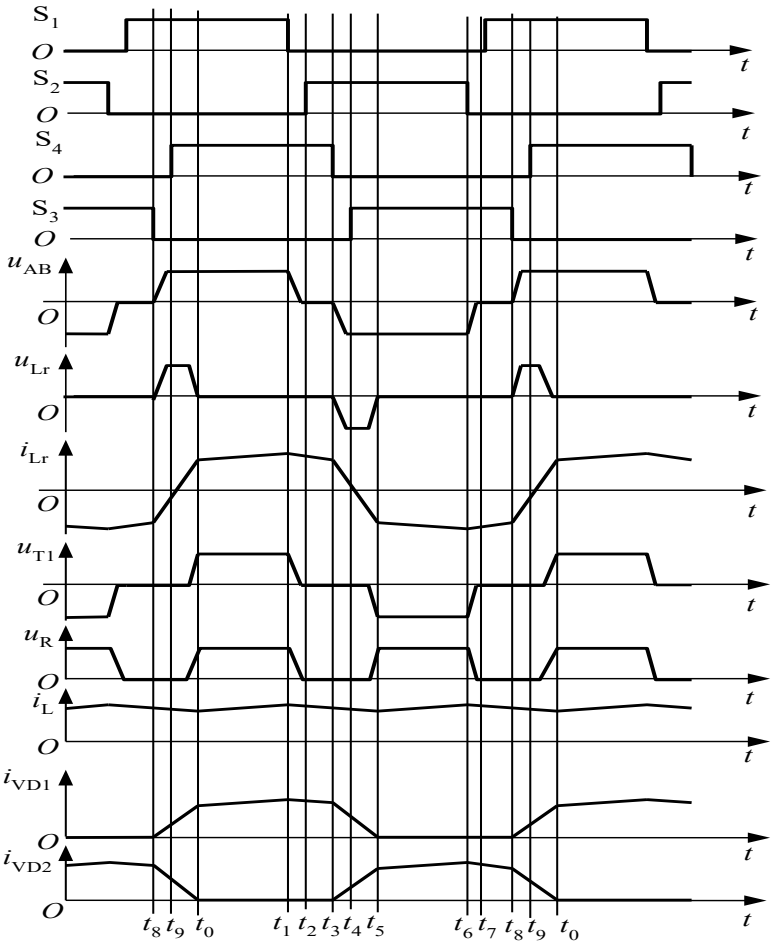


图8-15 移相全桥零电压开关PWM电路



- t_4~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$i_{Lr}=I_L/k_T$，i_{VD1}下降到零而关断，电流I_L全部转移到VD_2中。
- t_0~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~t_0时段中，电路的工作的过程与t_0~t_5时段完全对称。

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。

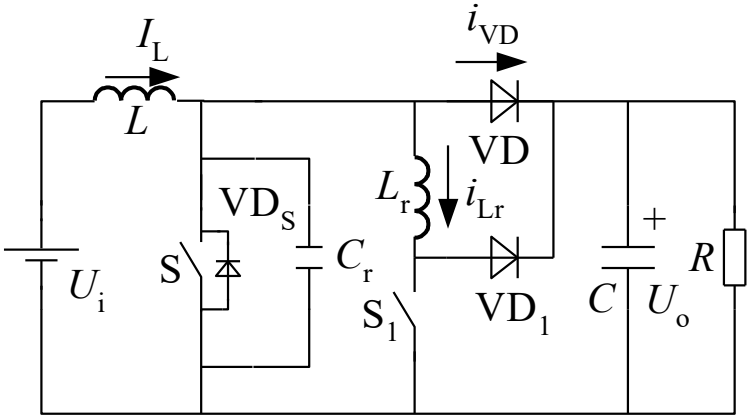


图8-19 升压型零电压转换PWM电路的原理图

8.3.4 零电压转换PWM电路

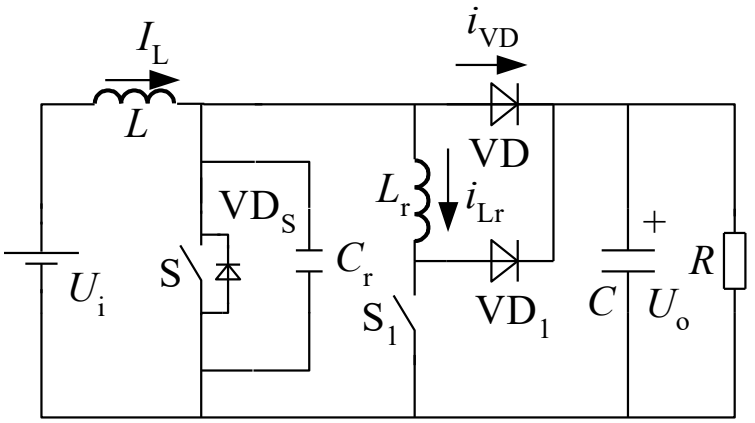


图8-19 升压型零电压转换PWM电路的原理图

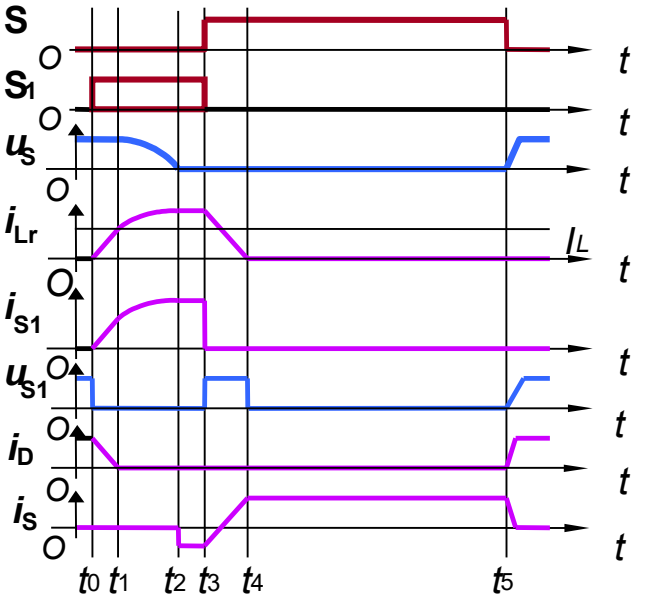


图8-20 升压型零电压转换PWM电路的理想化波形

◆工作过程

- t_0~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~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_S导通，u_{Cr}被箝位于零，而i_{Lr}保持不变。

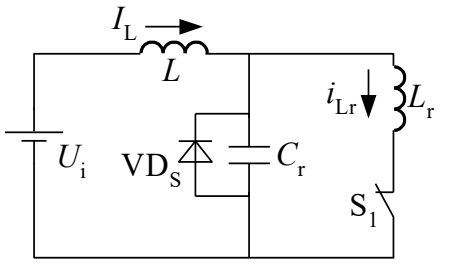


图 8-21 升压型零电压转换PWM电路在$t1$~$t2$时段的等效电路

8.3.4 零电压转换PWM电路

- t_2~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~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~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**。

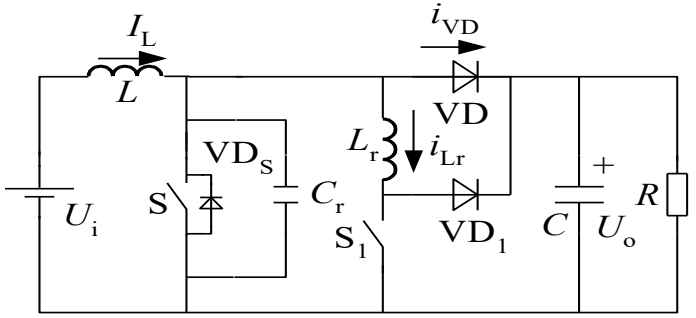


图8-19 升压型零电压转换PWM电路的原理图

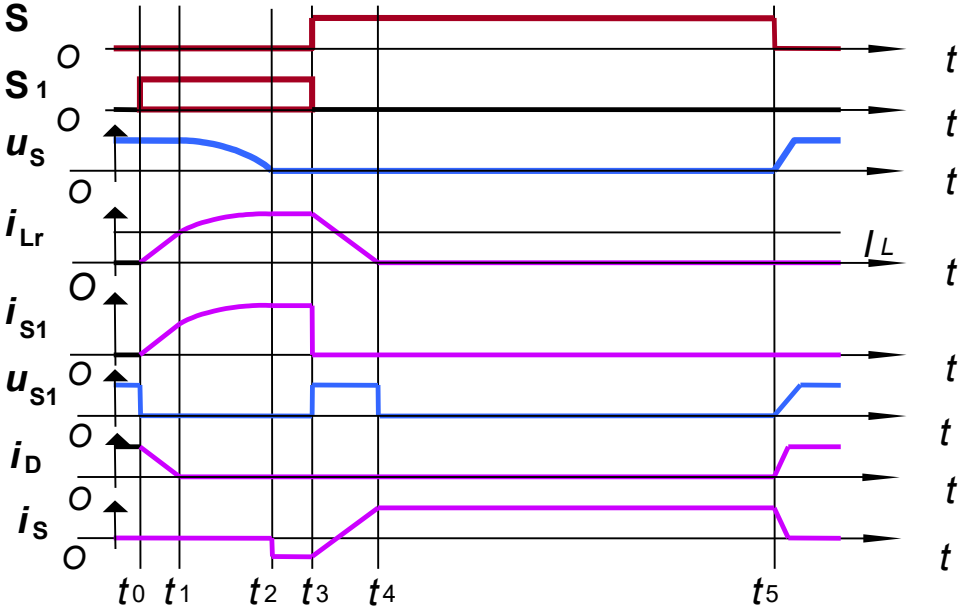


图8-20 升压型零电压转换PWM电路的理想化波形

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。

本章结束