

东南大学

电力电子技术

第 42 讲

主讲教师：王念春

380419124@qq.com

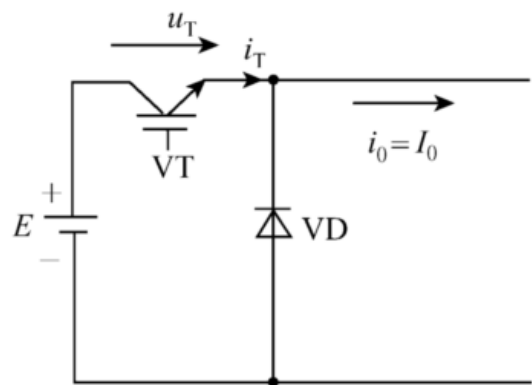




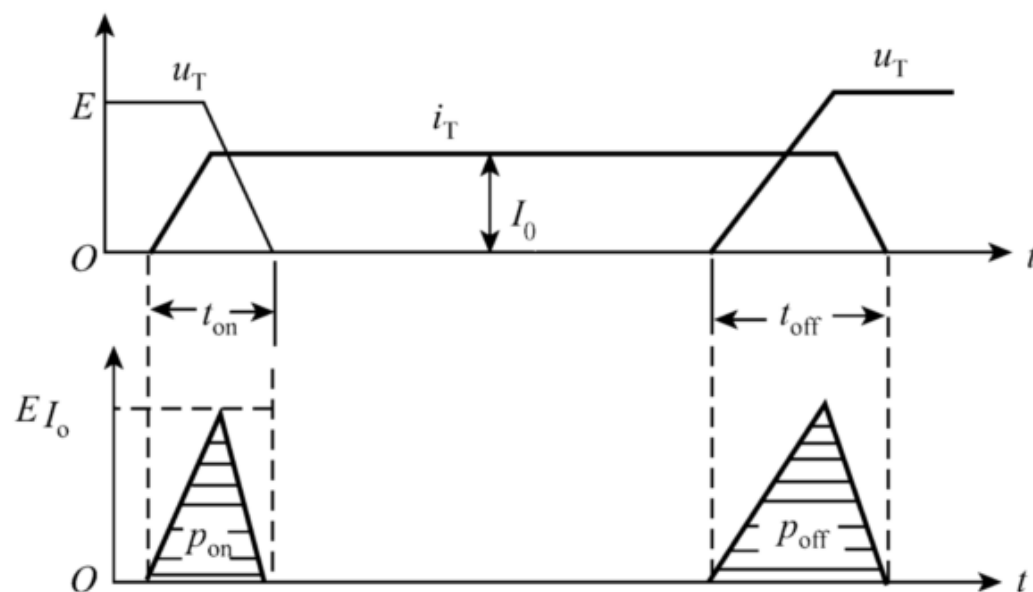
谐振软开关技术

一、谐振软开关的基本概念

1、开关过程器件损耗及硬、软开关方式



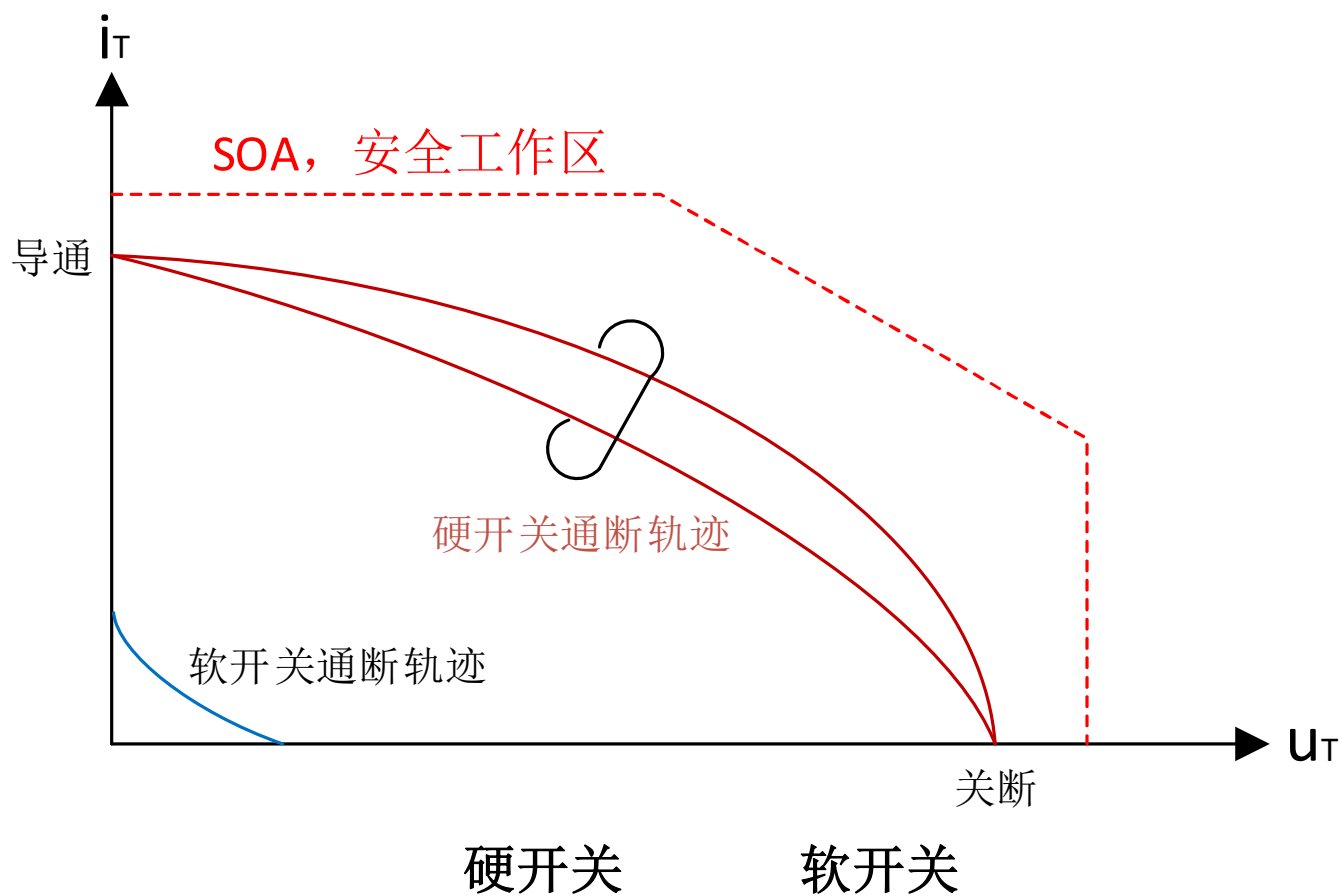
硬开关



软开关

一、谐振软开关的基本概念

1、开关过程器件损耗及硬、软开关方式



2、零电压开关与零电流开关

零电压开关：器件导通前两端电压就已为零的开通方式

零电流开关：器件关断前流过的电流就已为零的关断方式

靠电路开关过程前后引入谐振来实现

3、谐振软开关电路类型

(1) 准谐振电路。特点：电压或电流为正弦半波，故称准谐振。为最早出现的软开关电路。又可细分为：零电压开关准谐振电路ZVSQRC，零电流开关准谐振电路ZCSQRC，零电压开关多谐振电路ZVSMRC，谐波直流环节电路（resonant DC Link）

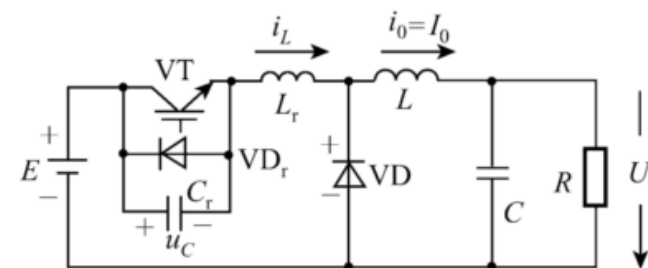
(2) 零开关PWM电路。引入辅助开关来控制谐振开始时刻，使谐振仅发生在主开关的开关状态改变前后。开关器件上的电压和电流基本是方波，仅在上升下降沿变缓，无过冲。电路可采用定频调宽PWM控制方式。有零电压开关PWM电路ZVSPWM与零电流开关PWM电路ZCSPWM。

(3) 零转换PWM电路。使用辅助开关来控制谐振开始时刻，谐振电路与主开关元件关联，电路输入电压与输出负载电流对谐振过程影响很小，电路在很宽的输入电压范围及大幅变化的负载下都能实现软开关工作。零电压转换PWM电路ZVTPWM，零电流转换PWM电路ZCTPWM。



二、典型谐振开关电路

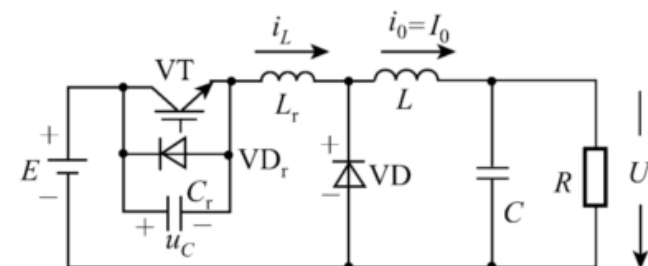
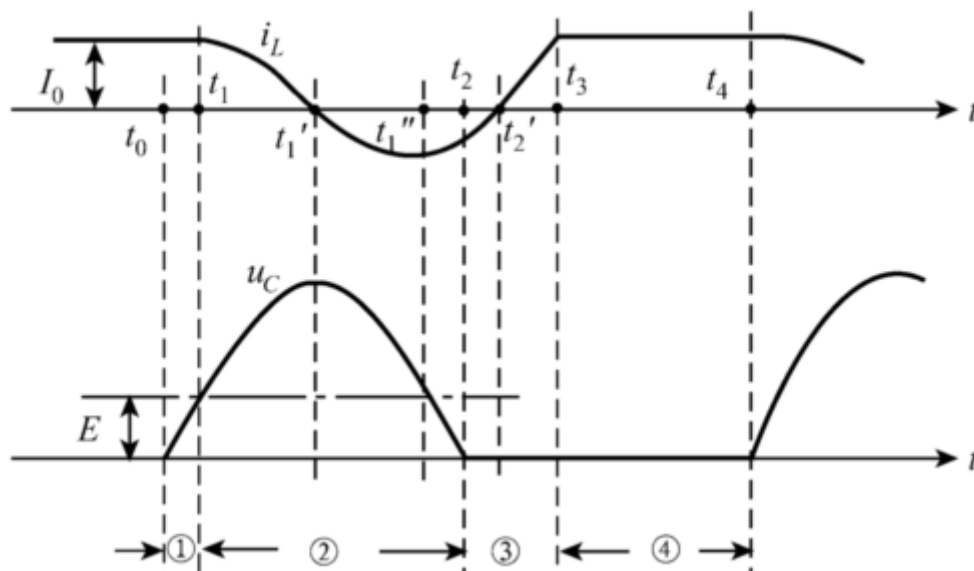
1、零电压开关准谐振电路 (ZVSQRC)



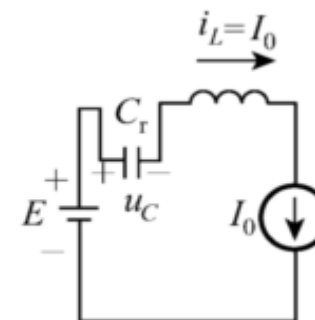
新增元件： L_r ， C_r ， VD_r ，电感可由变压器漏感替代，电容可由开关元件结电容替代。在高频谐振期间，时间很短，可认为输出电流 i_0 恒定为 I_0 。

二、典型谐振开关电路

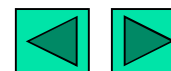
1、零电压开关准谐振电路 (ZVSQRC)



阶段①

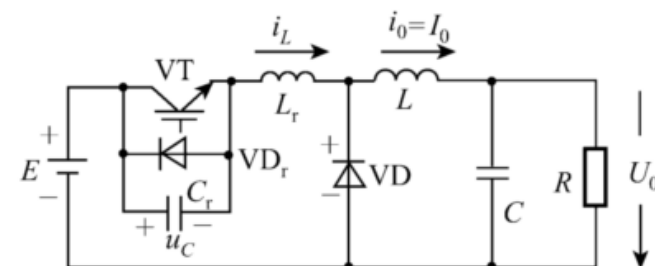
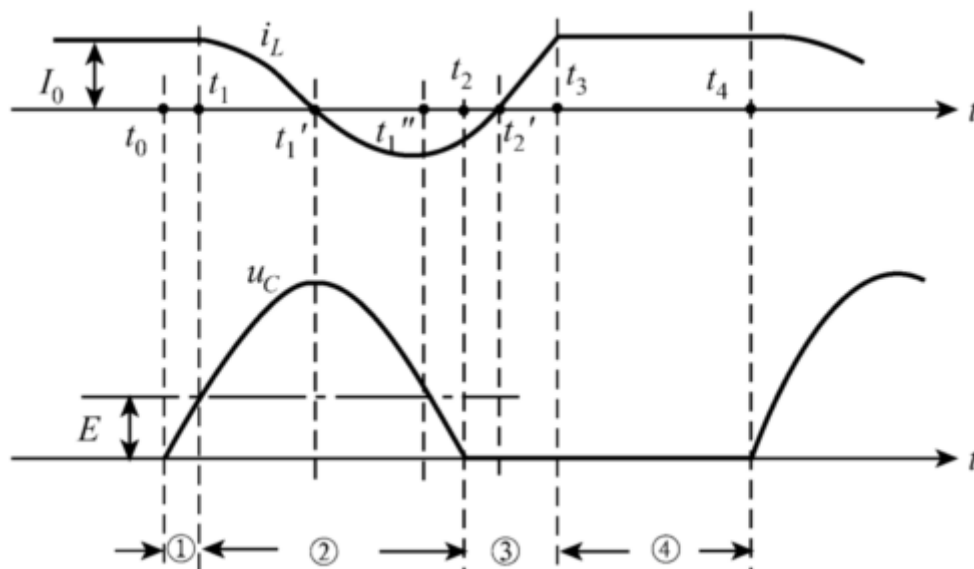
 $(t_0 \sim t_1)$ 

阶段①： t_0 前 V 导通， C_r 上电压为 0， t_0 时 V 在零电压下关断，电感中电流不能突变，以 $i_L = I_0$ 恒流对 C_r 进行充电， u_c 由 0 上升， t_1 时刻， $u_c = E$ 。

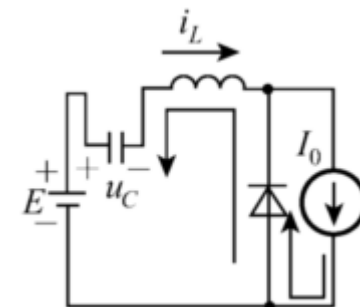


二、典型谐振开关电路

1、零电压开关准谐振电路 (ZVSQRC)



阶段②
($t_1 \sim t_2$)

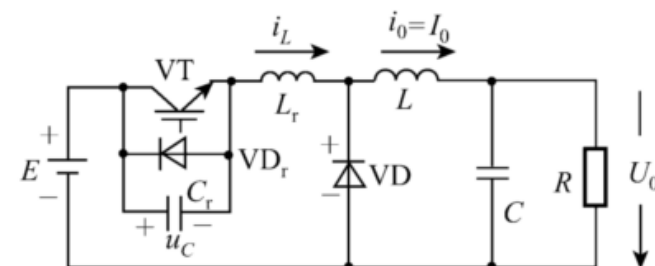
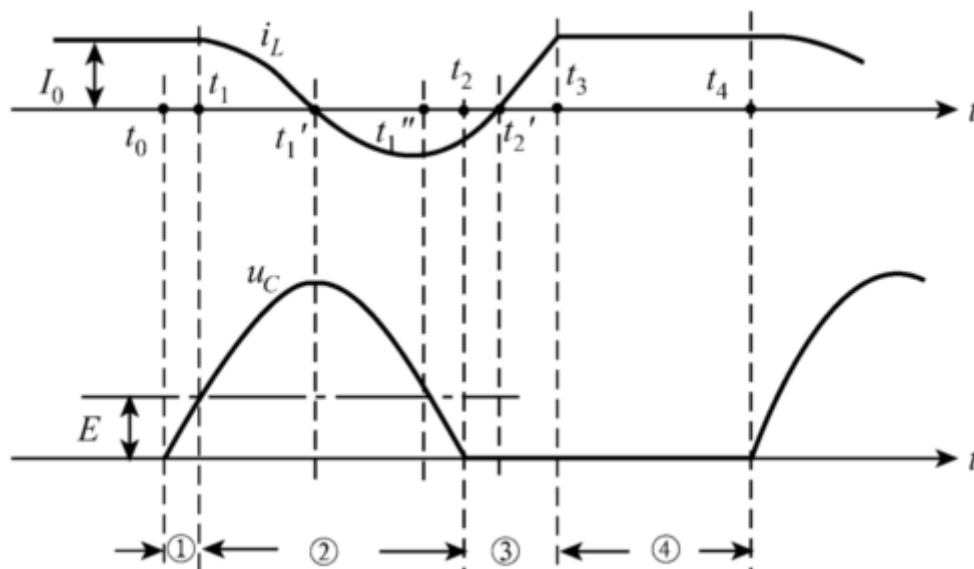
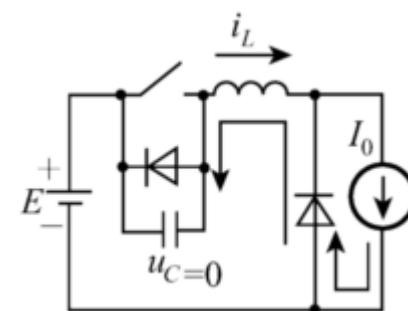


阶段②： $t > t_1$ 后， C_r 充电至 $u_C > E$ ，二极管 VD 承受正向阳极电压 ($u_C - E$) > 0 而导通，使 C_r 、 L_r 构成串联关系谐振。 $t_1 - t_1'$ 期间，电感能量向电容转移，电容电压上升，至 t_1' 电感电流过零，电容电压上升至峰值。 $t_1' - t_1''$ 期间，电容电场能量向电感转移，电容电压下降，电感电流经 VD 反向。 t_1'' 时刻， $u_C = E$ ， $i_L = -I_0$ 。 t_2 时刻， $u_C = 0$ ， VD_r 导通， u_C 被二极管箝位于零不能反向。



二、典型谐振开关电路

1、零电压开关准谐振电路 (ZVSQRC)

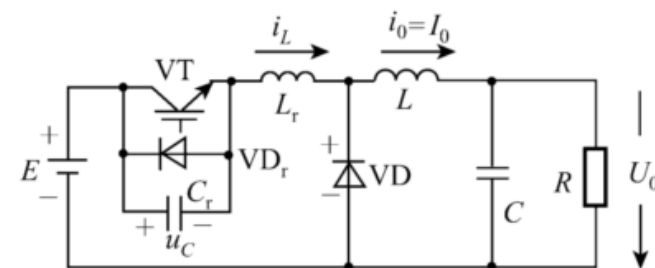
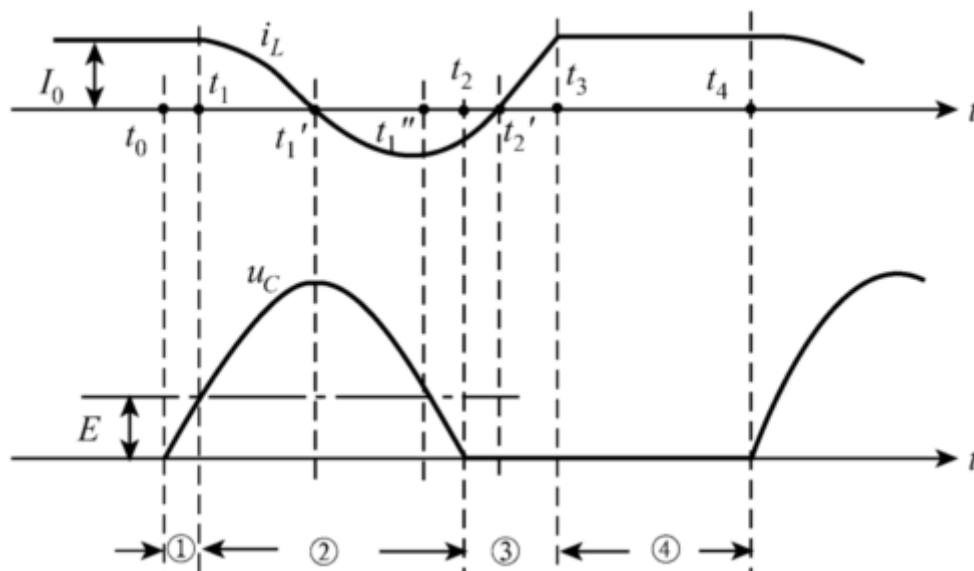
阶段③
($t_2 \sim t_3$)

阶段③： t_2 时刻 VD_r 导通，其导通的饱和压降使开关管V承受反偏电压而暂时不能导通，但为其创造了导通的零电压条件。这时给V施加触发脉冲，在 i_L 电流回振过零的 t_2' 时刻 VD_r 关断，开关管V在零电压零电流条件下导通， i_L 电流线性增长，到 t_3 时刻， $i_L = I_0$ 。

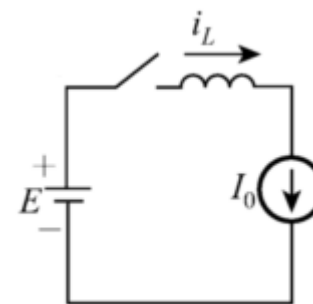


二、典型谐振开关电路

1、零电压开关准谐振电路 (ZVSQRC)



阶段④
($t_3 \sim t_4$)

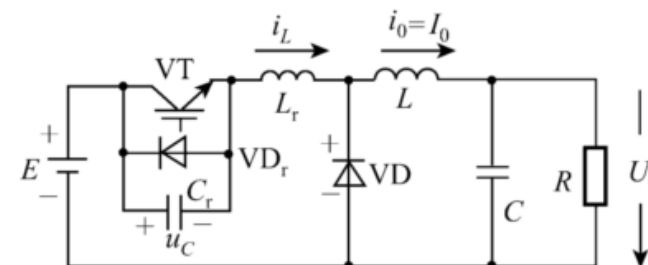
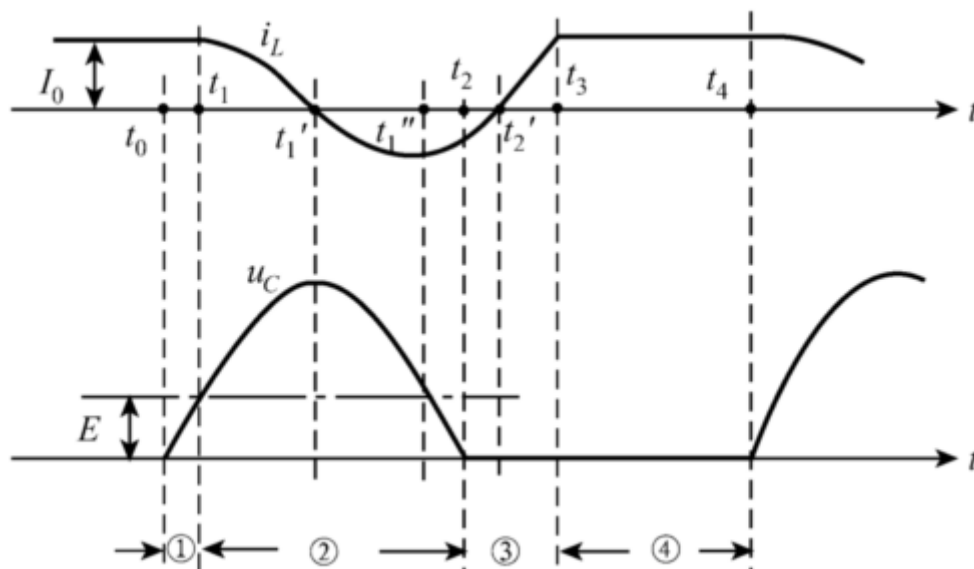


阶段④： t_3 时刻， $i_L = I_0$ 后，负载电流全部由V提供，二极管VD关断， C_r 两端电压 $u_C = 0$ ，再次为V关断准备了零电压条件，至 t_4 时刻，进入下一个重复周期。



二、典型谐振开关电路

1、零电压开关准谐振电路 (ZVSQRC)



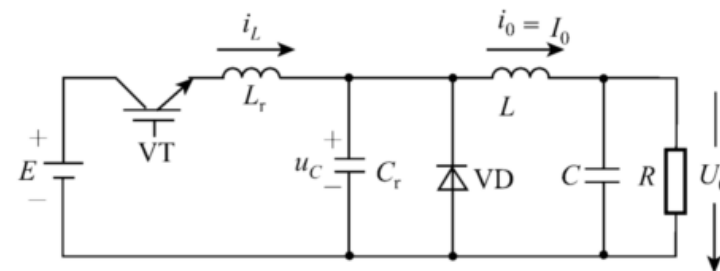
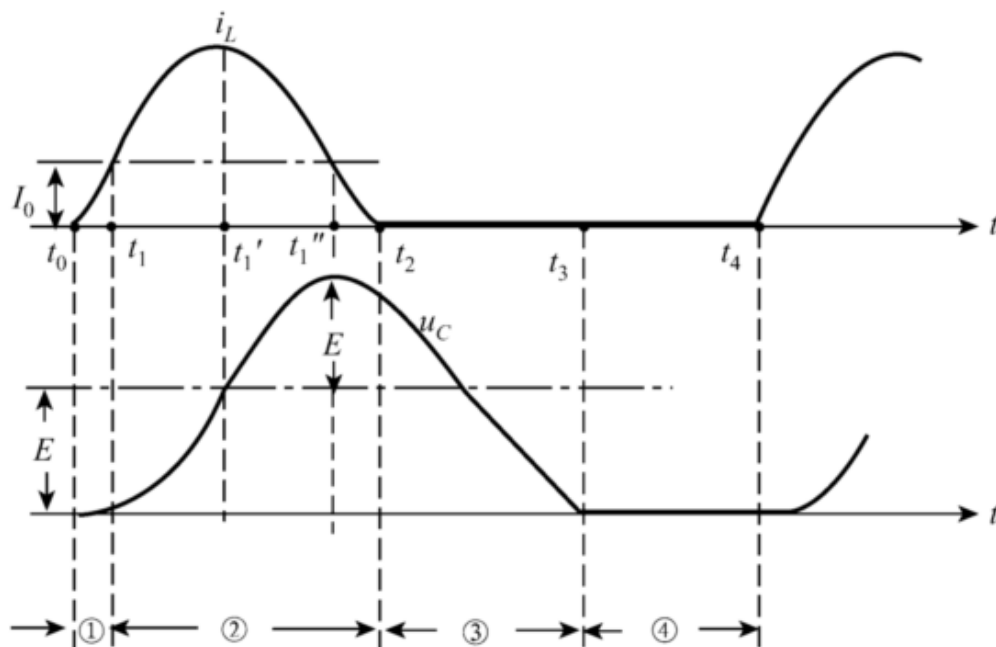
特点:

四个阶段中，阶段④的时刻可通过开关管V的触发信号进行控制，因此准谐振电路采用**调频控制**。

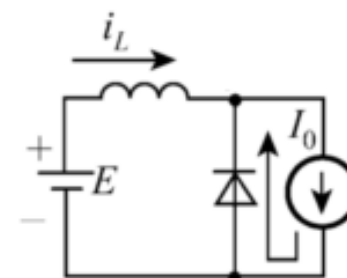
u_C 与开关管并联，从 u_C 的波形可以看出，谐振电压峰值高于电源电压E的2倍以上，**开关管的耐压要比较高**，这是ZVSQRC的缺点。



2、零电流开关准谐振电路 (ZCSQRC)



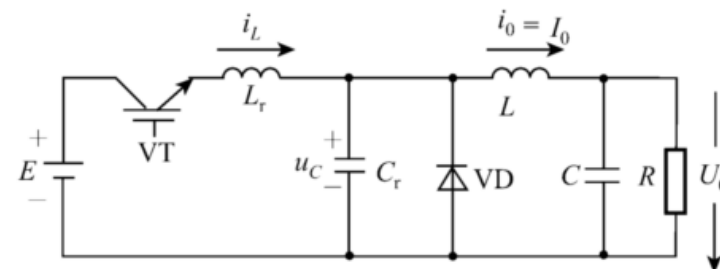
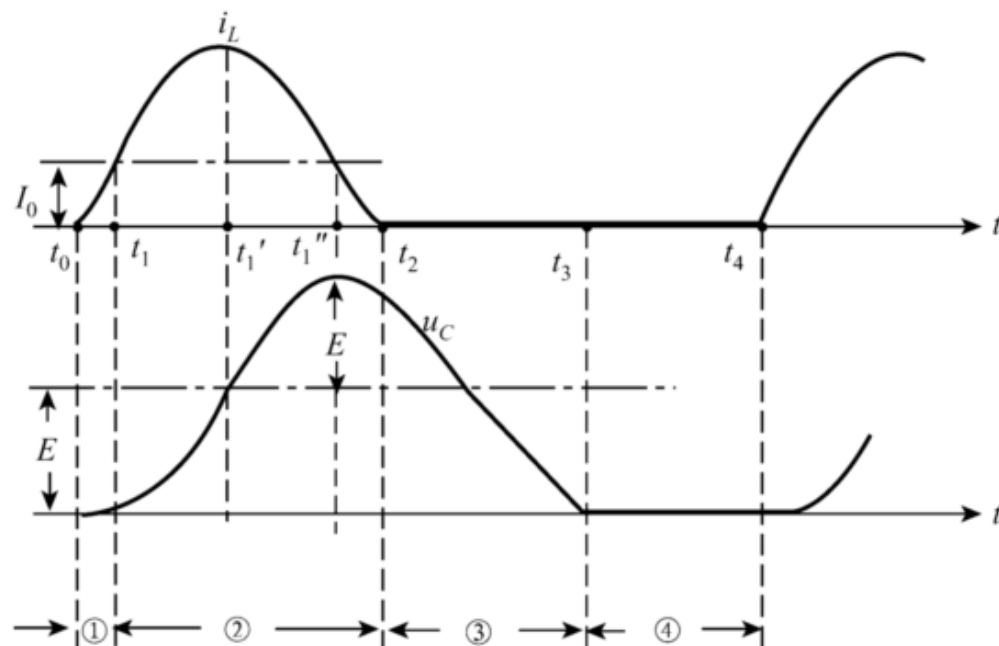
阶段①
($t_0 \sim t_1$)



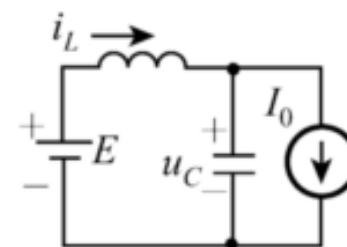
阶段①： t_0 时刻V导通，负载电流 $i_0 = I_0$ ，由储能电感L经续流二极管VD提供，与VD并联的谐振电容电压被箝位至 $u_C = 0$ 。电源电压全部施加在谐振电感上，电流 i_L 线性上升， t_1 时刻， $i_L = I_0$ ，负载电流 i_0 全部由开关管V提供，VD关断， C_r 两端电压上升。



2、零电流开关准谐振电路 (ZCSQRC)



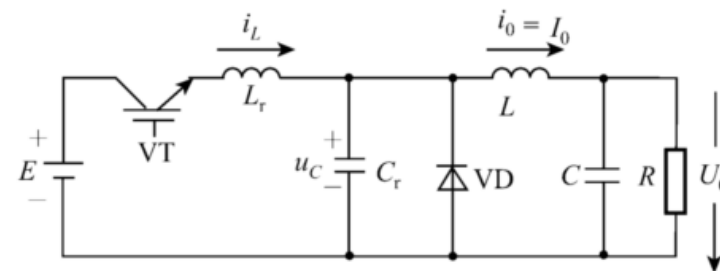
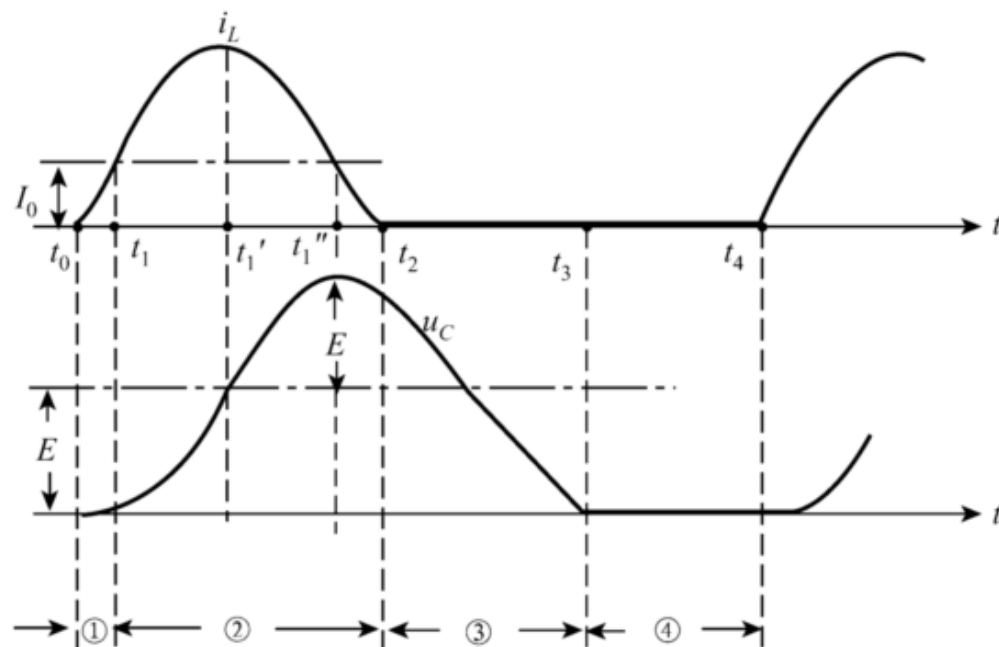
阶段②
($t_1 \sim t_2$)



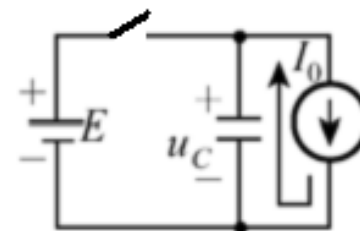
阶段②： $t > t_1$ 后， $i_L > I_0$ ，差值 $i_L - I_0$ 流入 C_r 使电容充电， u_C 电压上升。 t_1 时刻 i_L 上升至峰值， $u_C = E$ ； t_1'' 时刻， i_L 从峰值下降至 I_0 ， $u_C = 2E$ 。 t_2 时刻流经 V 的电流 i_L 下降至零。 V 为单向开关， i_L 不能反向振荡为负，此时满足零电流条件，应取消 V 触发信号，零电流关断 V 。



2、零电流开关准谐振电路 (ZCSQRC)



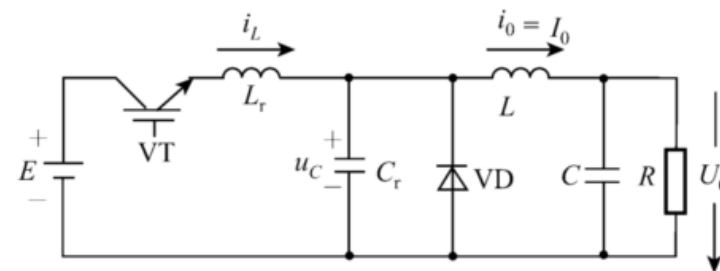
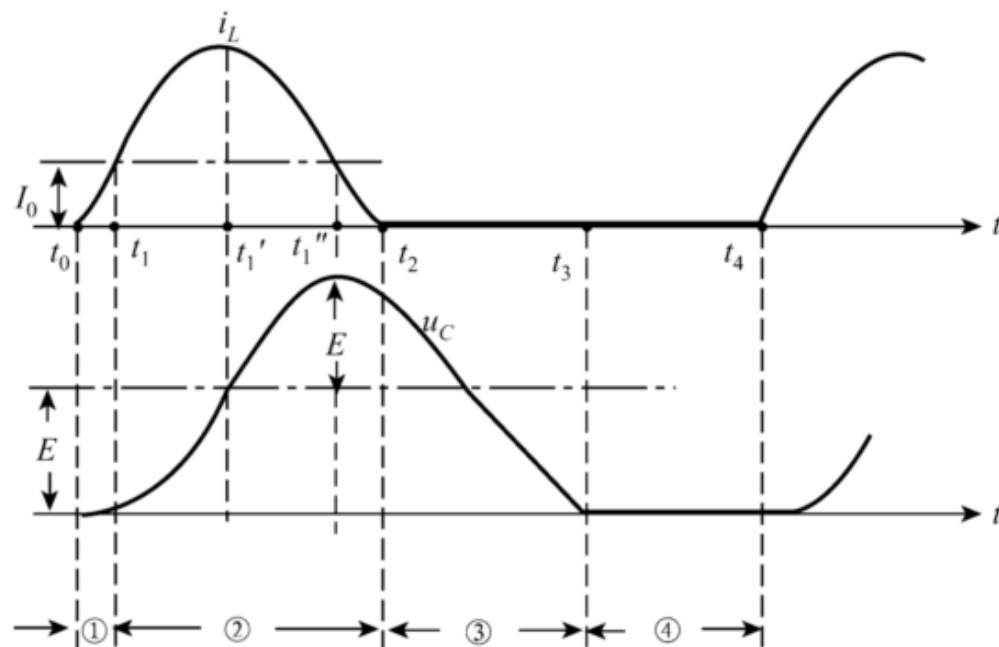
阶段③
($t_2 \sim t_3$)



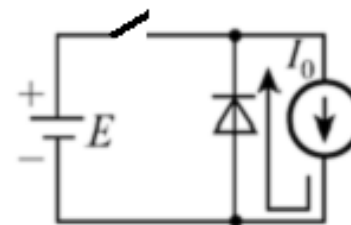
阶段③： $t > t_2$ 后V零电流关断，谐振电容 C_r 由负载电流 I_0 反向充电， u_C 电压线性下降， t_3 时刻， $u_C = 0$ ，续流二极管VD反偏消失，开始导通。



2、零电流开关准谐振电路 (ZCSQRC)



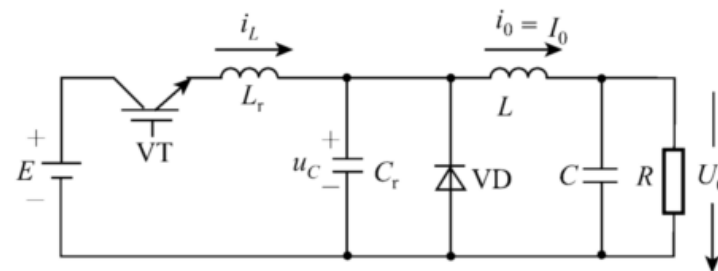
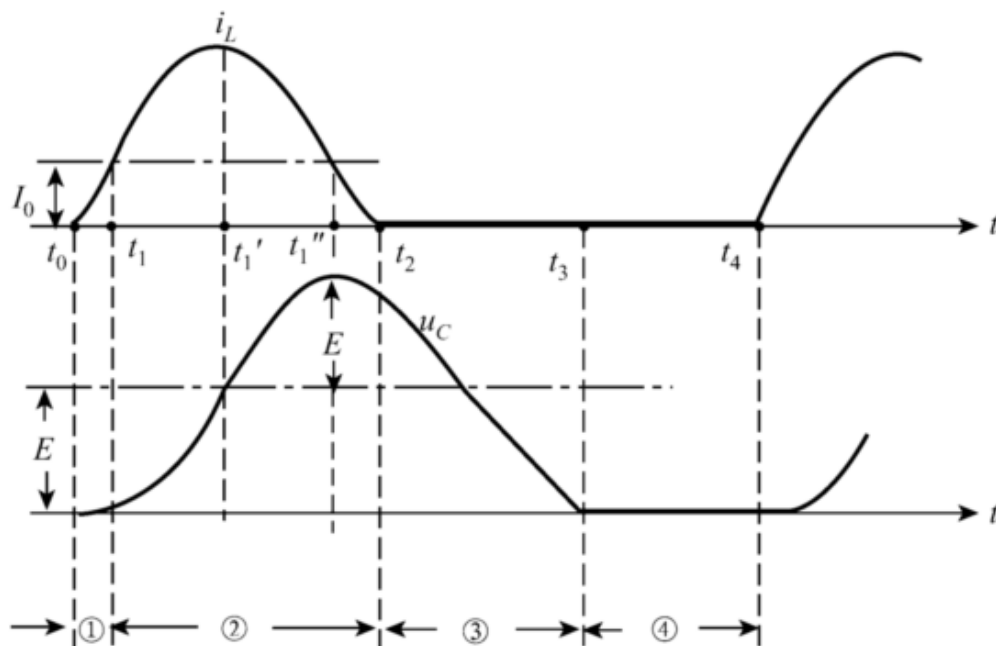
阶段④

 $(t_3 \sim t_4)$ 

阶段④： $t > t_3$ 后负载电流 $i_0 = I_0$ 由 VD 提供，直至 t_4 时刻，V 导通，开始一个新的周期。



2、零电流开关准谐振电路 (ZCSQRC)



特点:

四个阶段中，阶段④的时刻可通过开关管V的触发信号进行控制，因此可实现**调频控制**。

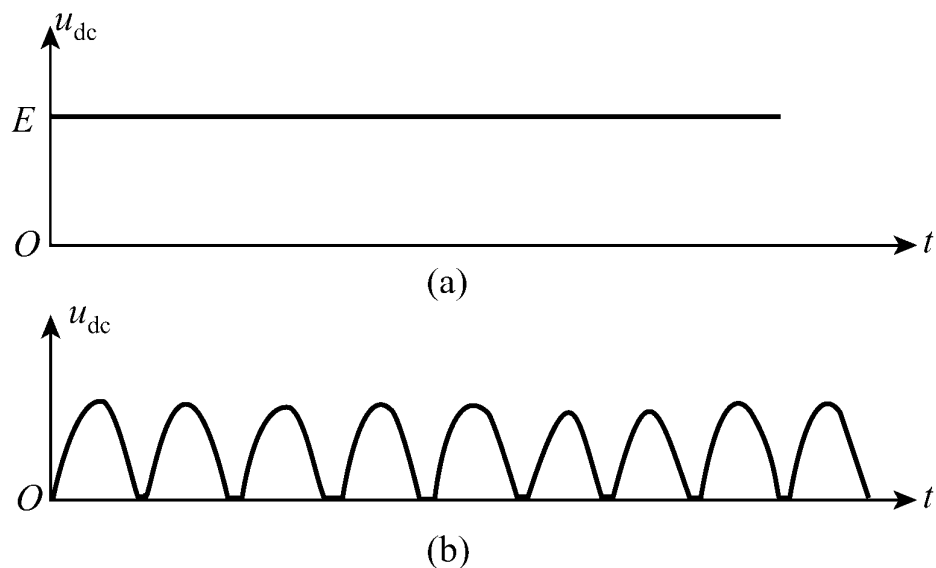
V导通时其上电压为电源电压E，仍有开关损耗，只是减小；流过开关管V的电流 i_L 峰值显著大于负载电流 I_0 ，开关管的通态损耗变大；续流二极管承受的电压 u_C 为电源电压的2倍，比较高。

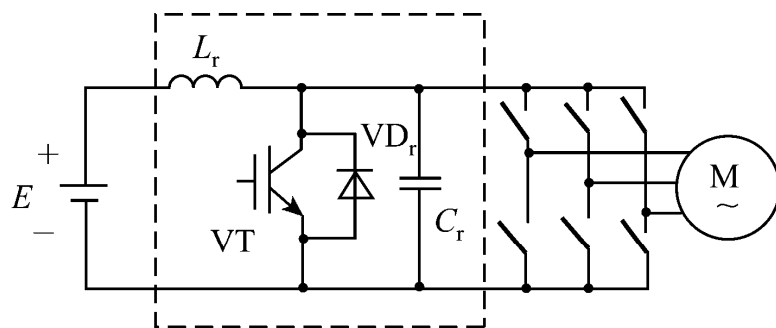


3、谐振直流环

基本思想：

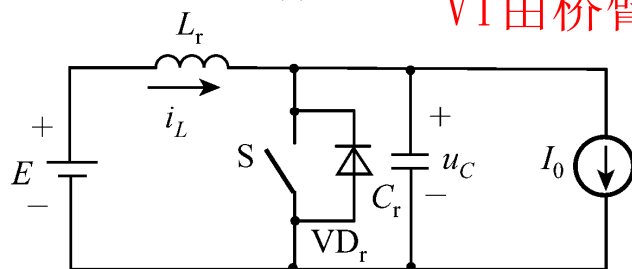
在直流环节中引入谐振，使直流母线电压高频振荡，出现电压过零时刻，为逆变电路功率器件提供了实现软开关的条件。



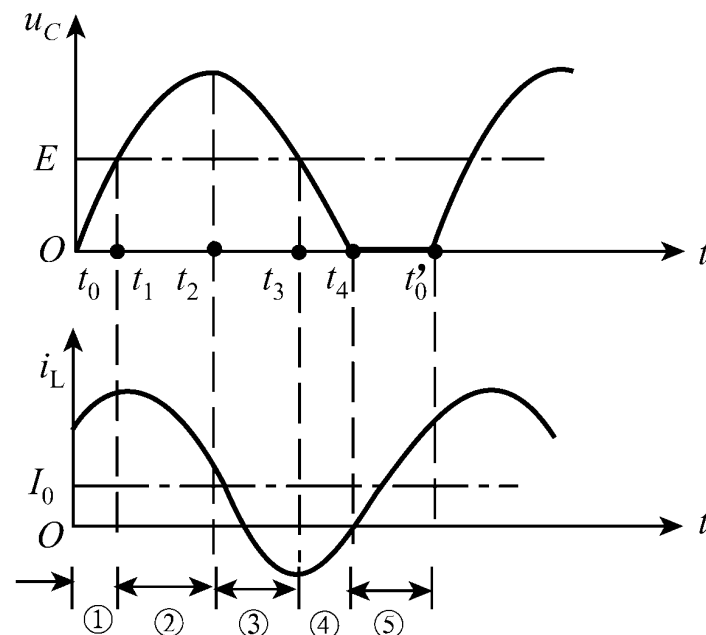


(a)

VT由桥臂开关取代

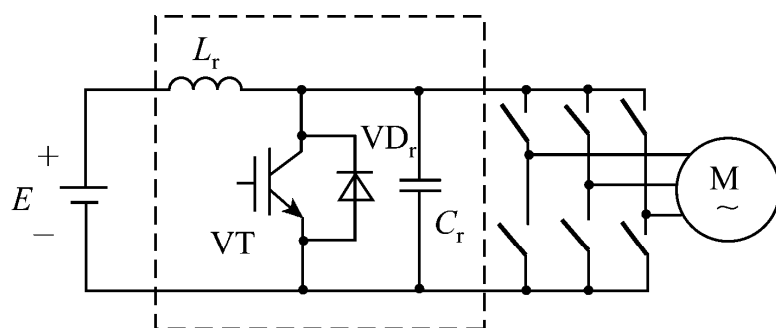


(b)

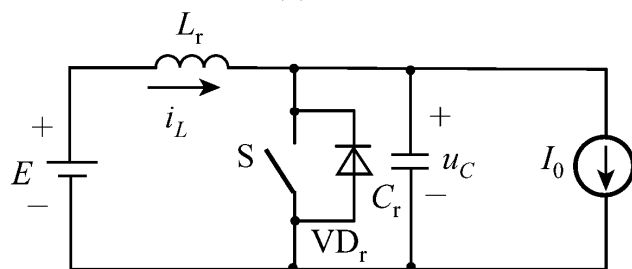


阶段①： t_0 前S闭合，谐振电感电流 $i_L > I_0$ （负载电流）。 t_0 时刻S打开， $L_r C_r$ 串联谐振起作用， i_L 对 C_r 充电， L_r 中的磁场能量转换为 C_r 中的电场能量， C_r 上的电压 u_C 上升。 t_1 时刻， $u_C = E$ 。

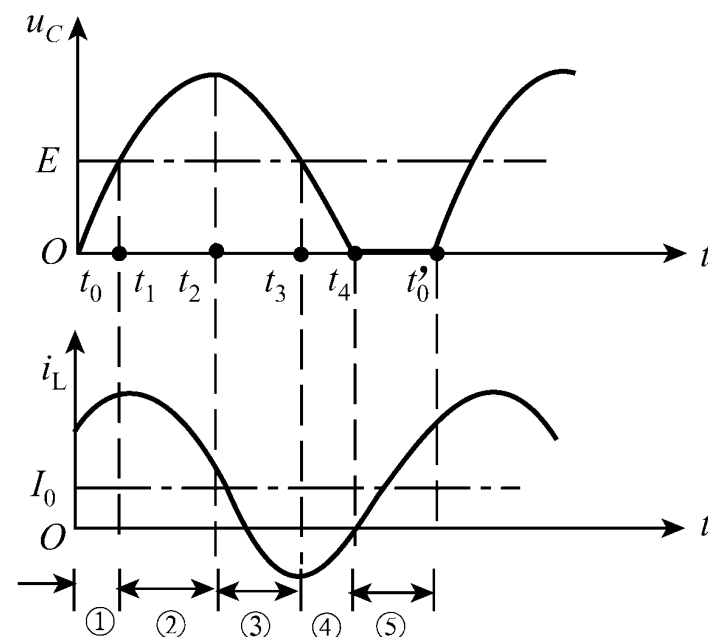




(a)

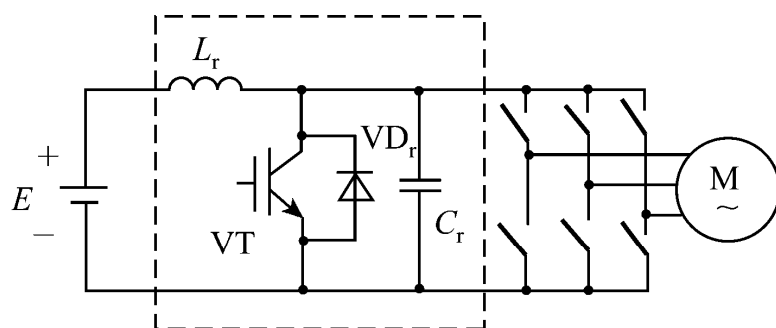


(b)

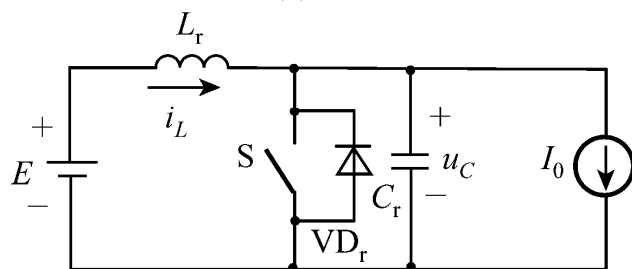


阶段②： t_1 时刻， $u_C=E$ ， L_r 两端电压为零，谐振电流 i_L 达到最大值。
 $t > t_1$ 后， C_r 继续充电， u_C 上升， i_L 下降。 t_2 时刻再次达到 $i_L=I_0$ ， u_C 达到谐振峰值。

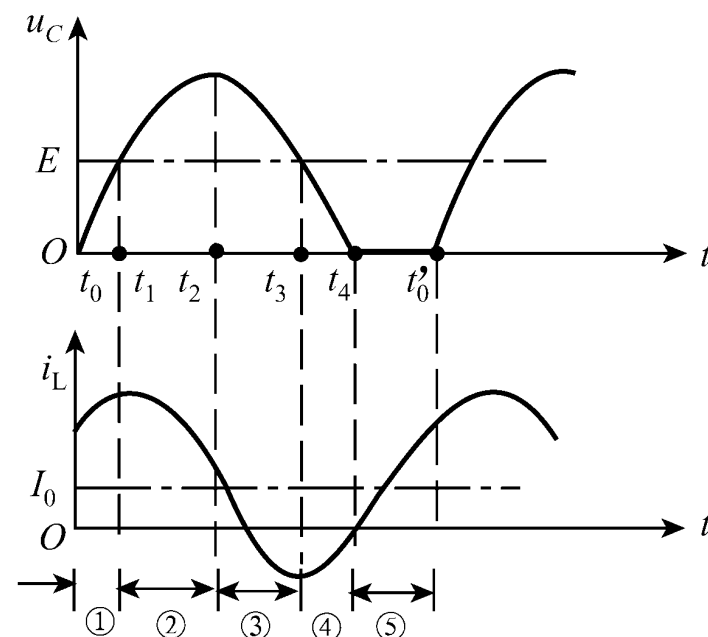




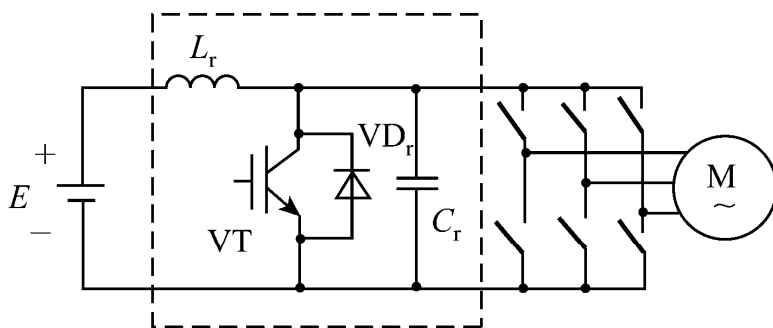
(a)



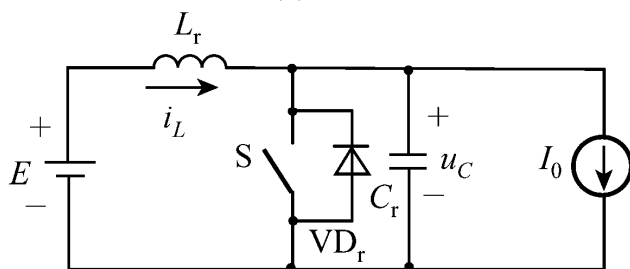
(b)



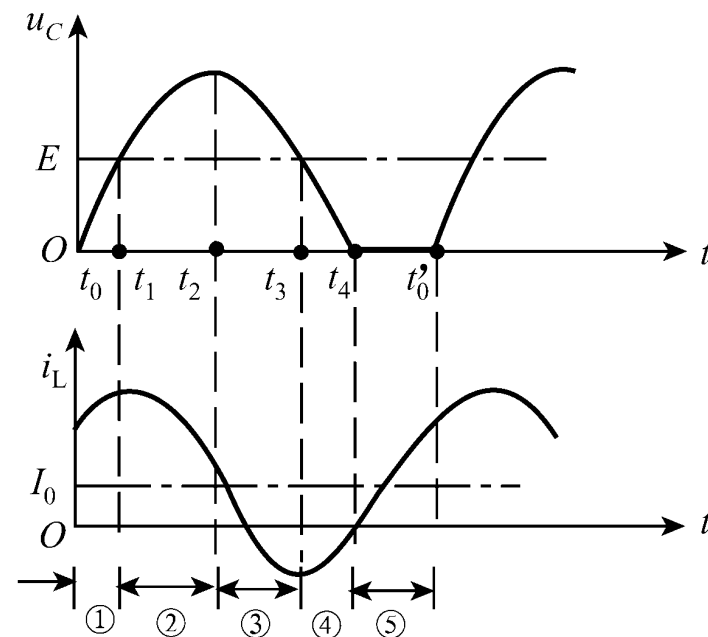
阶段③： $t > t_2$ 后，由 u_C 提供负载电流 I_0 。因 u_C 大于 E ，同时向 L_r 反向供电，使 i_L 继续下降并过零反向。 t_3 时刻 i_L 反向增长至最大，这时 $u_C = E$ 。



(a)

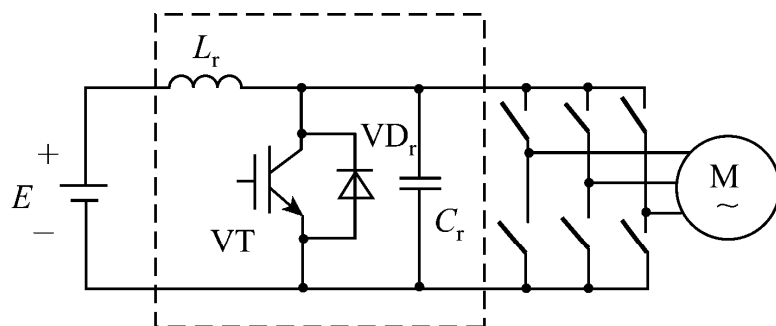


(b)

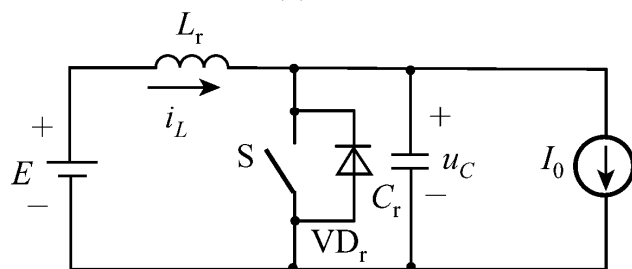


阶段④： $t > t_3$ 后， $|i_L|$ 开始减小， u_C 进一步下降。 t_4 时刻 $u_C = 0$ ，使与 C_r 反并联的二极管 VD_r 导通，S 电压被箝位于零，为开关管零电压导通与闭合提供了条件。

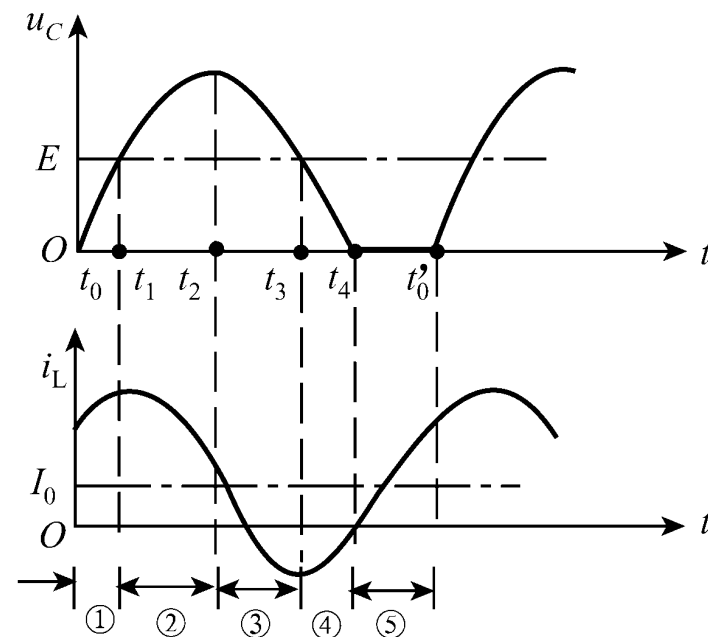




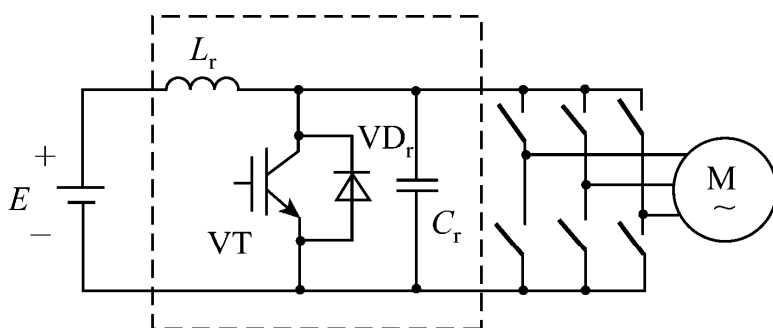
(a)



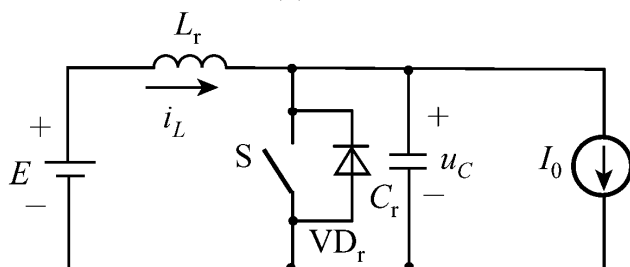
(b)



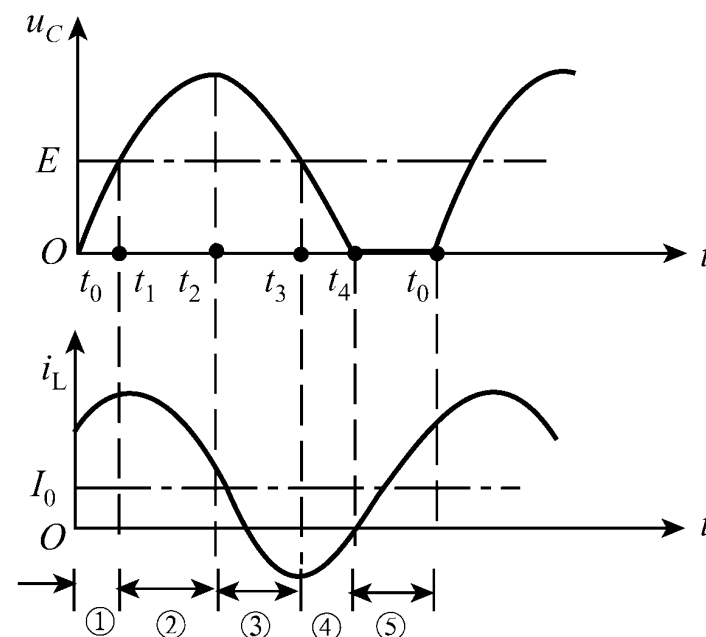
阶段⑤：S闭合后， i_L 线性增长直至 $t=t_0'$ ， $i_L=I_0$ ，S再次打开。



(a)



(b)



特点:

- (1) 逆变器直流母线电压不再平直。
- (2) 逆变器的功率开关器件应安排在过零时刻进行开关状态切换，实现零电压软开关操作。
- (3) 直流环谐振电压峰值很高，增加了对开关器件的耐压要求。



全桥零电压开关PWM电路

参见教材P268-271页。

P272页本章小结

硬开关软开关的区别；

软开关的分类；

零电压开关准谐振电路的分析，特点。



作业:

P.272

习题 1、 3

