

电气精品教材丛书

“十三五”江苏省高等学校重点教材

工业和信息化部“十四五”规划教材

电力电子技术 · Power Electronics

第8章 软开关直流变换器

2024/1/2



8.1 软开关变换器的分类

8.2 准谐振变换器





8.1 软开关变换器的分类

8.1.1 硬开关的概念

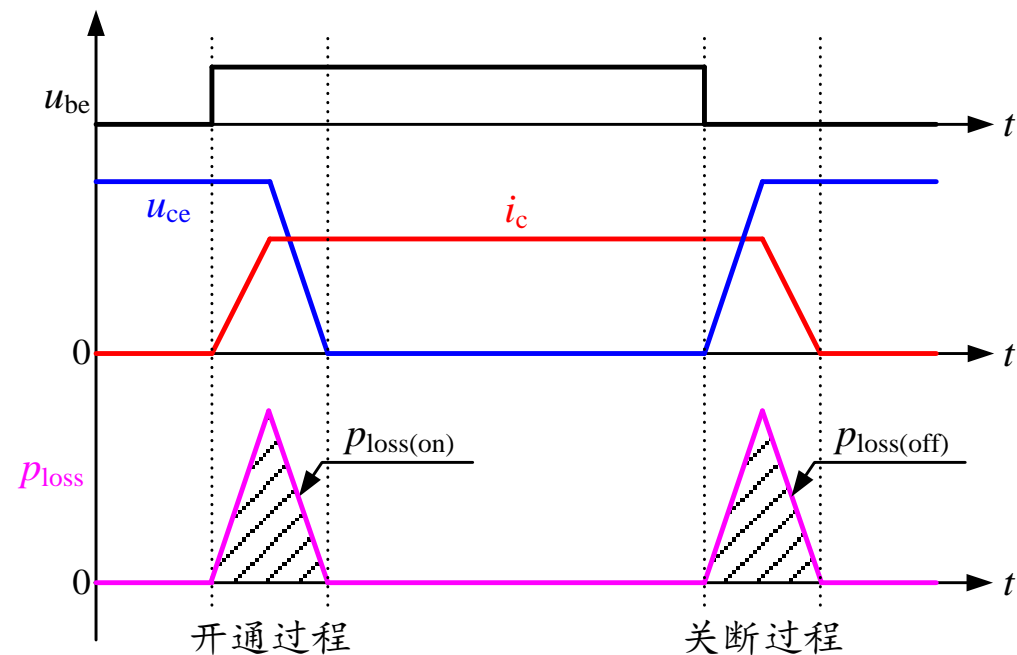
8.1.2 软开关的概念

8.1.3 软开关直流变换器的分类



硬开关的概念

- 实际开关管并非理想器件，开关管的开通和关断需要时间。
- 开关管开通时，其电流上升很快；开关管关断时，其电压上升很快。这种开关方式为“硬开关”，会产生很大的功率损耗与电磁干扰。



硬开关时开关管的电压和电流波形



8.1 软开关变换器的分类

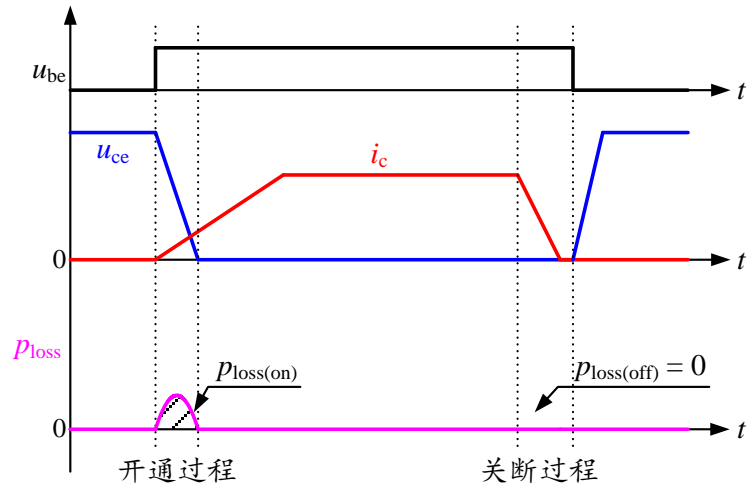
8.1.1 硬开关的概念

8.1.2 软开关的概念

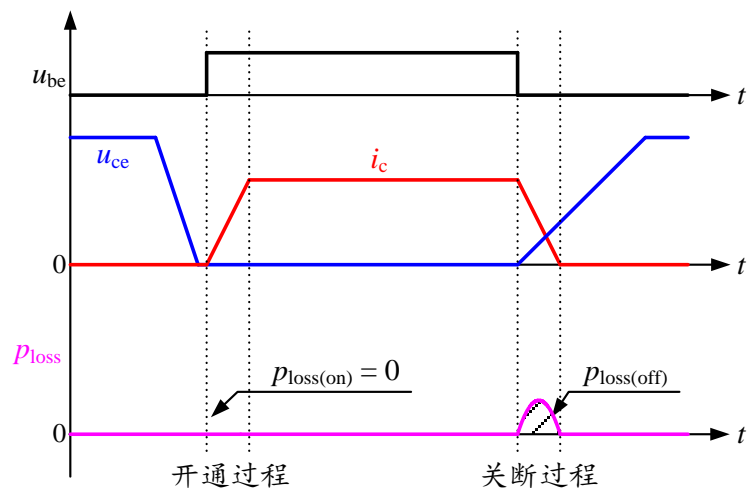
8.1.3 软开关直流变换器的分类



软开关的概念



(a) 零电流开关



(b) 零电压开关

软开关时开关管的电压和电流波形

■ 软开关的作用:

为了减小开关变换器的体积和重量, 必须提高开关频率, 但开关损耗也随之增加, 这不仅降低了变换器效率, 还导致散热器体积重量的增加。而软开关能够减小开关损耗。

■ 减小开通损耗的方法:

(1) 开关管开通时, 限制其电流上升率, 使其缓慢上升, 这样减小了电流和电压交叠区内电流的大小, 这就是零电流开通。

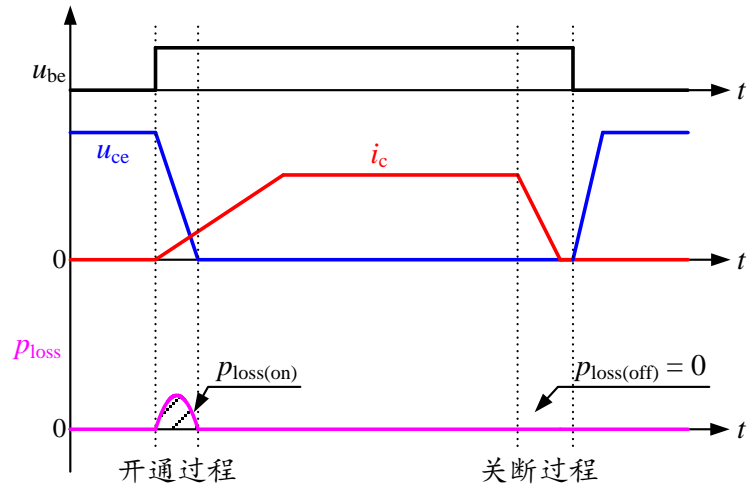
(2) 开关管开通前, 使其电压下降到零, 这就是零电压开通。

■ 减小关断损耗的方法:

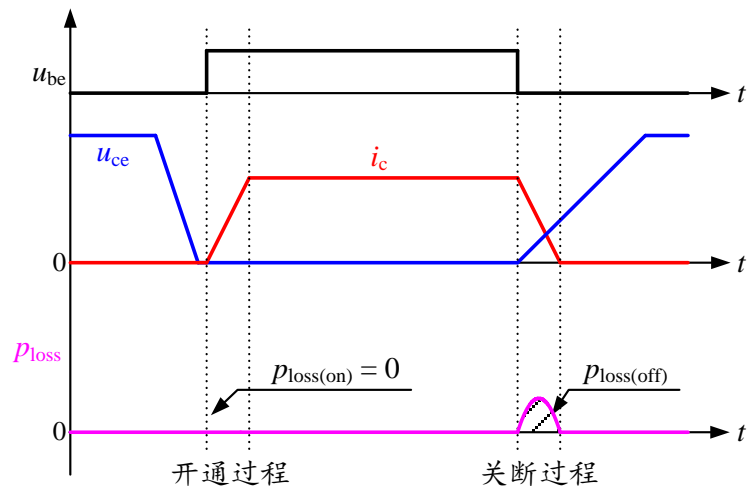
(1) 开关管关断前, 使电流减小到零, 这就是零电流关断。

(2) 开关管关断时, 限制其电压的上升率, 使其缓慢上升, 这就是零电压关断。

软开关的概念



(a) 零电流开关



(b) 零电压开关

软开关时开关管的电压和电流波形

■ 零电流开关 (ZCS):

如果开关管是零电流开通, 那么一定是零电流关断。

开关管开通时, 其电流慢慢增加, 近似为零电流开通; 关断时, 需要提前将其电流减小到零, 是真正的零电流关断。

■ 零电压开关 (ZVS):

如果开关管是零电压开通, 那么一定是零电压关断。

开关管关断时, 电压慢慢上升, 近似为零电压关断; 开通时, 其反并二极管已提前导通, 将开关管两端电压箝位为零, 是真正的零电压开通。

■ 软开关的概念:

开关管如果实现 ZCS, 开通时电流缓慢上升, 关断时电流为零; 实现 ZVS 时, 关断时电压缓慢上升, 开通时电压为零。开关过程被软化了, 称之为**软开关**。



8.1 软开关变换器的分类

8.1.1 硬开关的概念

8.1.2 软开关的概念

8.1.3 软开关直流变换器的分类



软开关直流变换器的分类

有损缓冲电路

(1) 并联 RCD 缓冲电路

(2) 串联 RLD 缓冲电路

※ 不会提高变换器效率，
甚至会使效率降低。只是**转移**
开关损耗的方法。

单管直流变换器

(1) 准谐振和多谐振变换器

(2) 零开关 PWM 变换器

a) ZCS PWM 变换器

b) ZVS PWM 变换器

(3) 零转换 PWM 变换器

a) 零电压转换 PWM 变换器

b) 零电流转换 PWM 变换器

桥式直流变换器

(1) 全谐振型变换器

按照谐振元件的个数可进一步分类

a) 二阶谐振变换器

b) 三阶谐振变换器

LLC 谐振变换器

LCC 谐振变换器

c)

(2) 移相控制全桥变换器



8.2 准谐振变换器

8.2.1 谐振开关

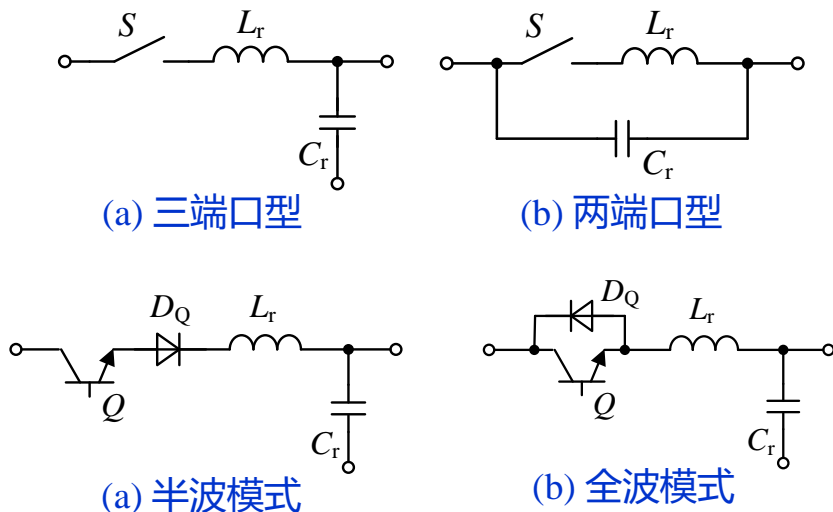
8.2.2 零电流开关准谐振变换器

8.2.3 零电压开关准谐振变换器



谐振开关

零电流谐振开关



谐振电感: 限制开通时的电流上升率;
谐振电容: 与电感谐振工作, 使电感电流在开关管关断前谐振到零。

根据端口数可分为**三端口型**和**两端口型**。

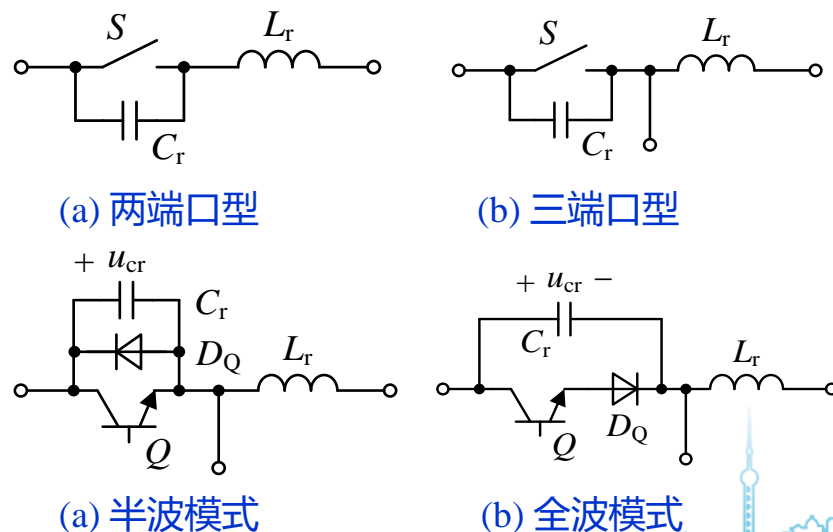
半波模式: S 单方向导通
全波模式: S 双方向导通

零电压谐振开关

谐振电容: 限制关断时的电压上升率;
谐振电感: 与电容谐振工作, 使电容电压在开关管开通前谐振到零。

根据端口数可分为**两端口型**和**三端口型**。

半波模式: S 单方向导通
全波模式: S 双方向导通





8.2 准谐振变换器

8.2.1 谐振开关

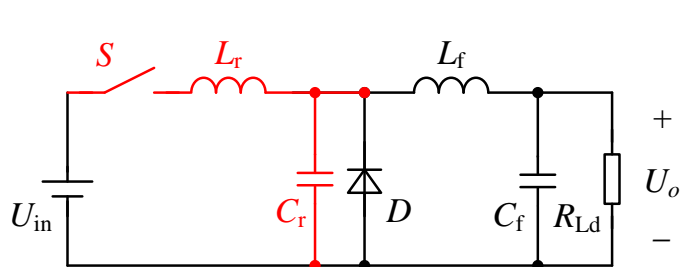
8.2.2 零电流开关准谐振变换器

8.2.3 零电压开关准谐振变换器

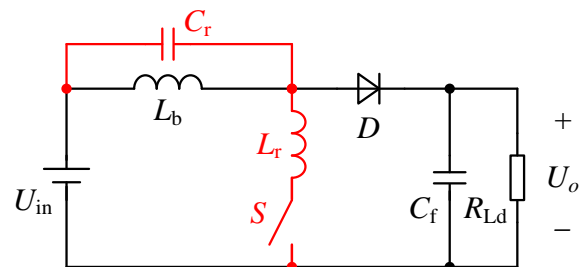


零电流开关准谐振变换器

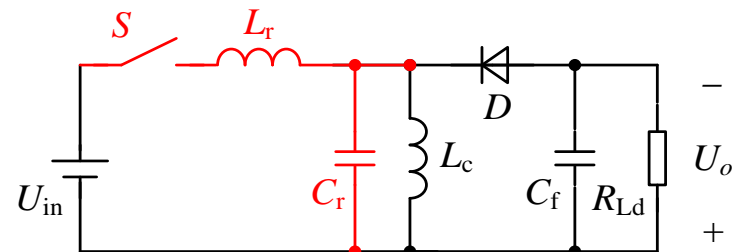
非隔离型



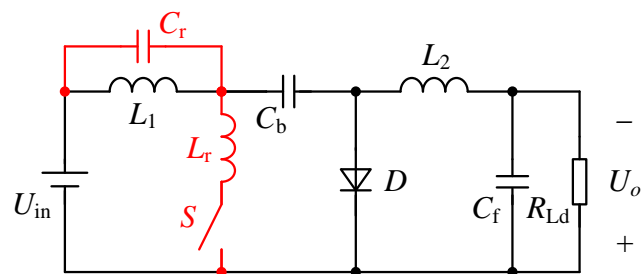
(a) Buck



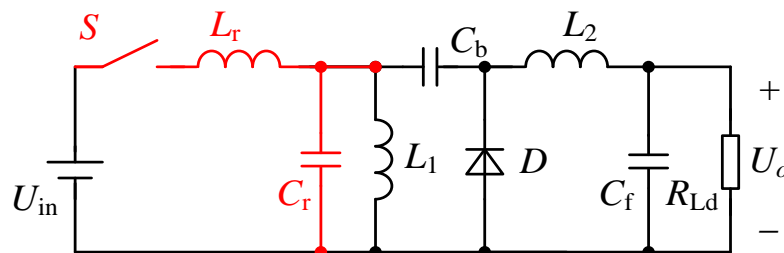
(b) Boost



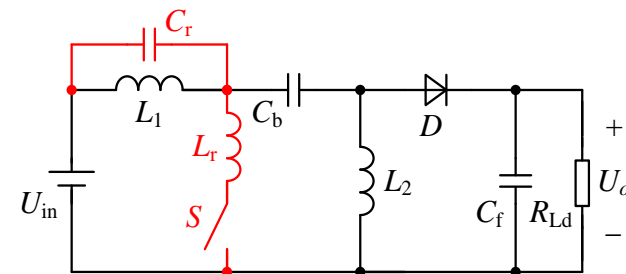
(c) Buck-Boost



(d) Cuk

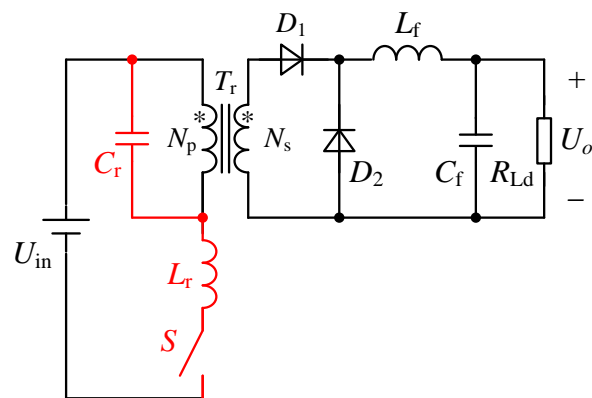


(e) Zeta

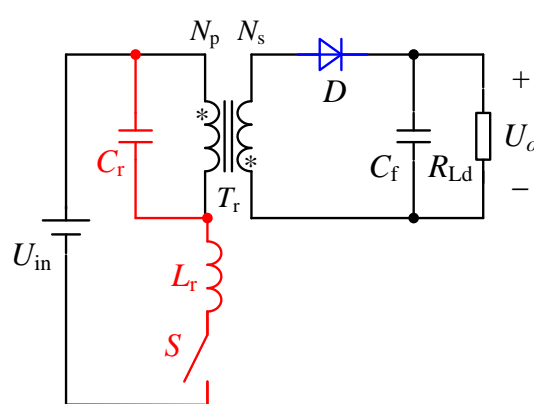


(f) SEPIC

隔离型



(g) 正激变换器



(h) 反激变换器

零电流开关准谐振变换器

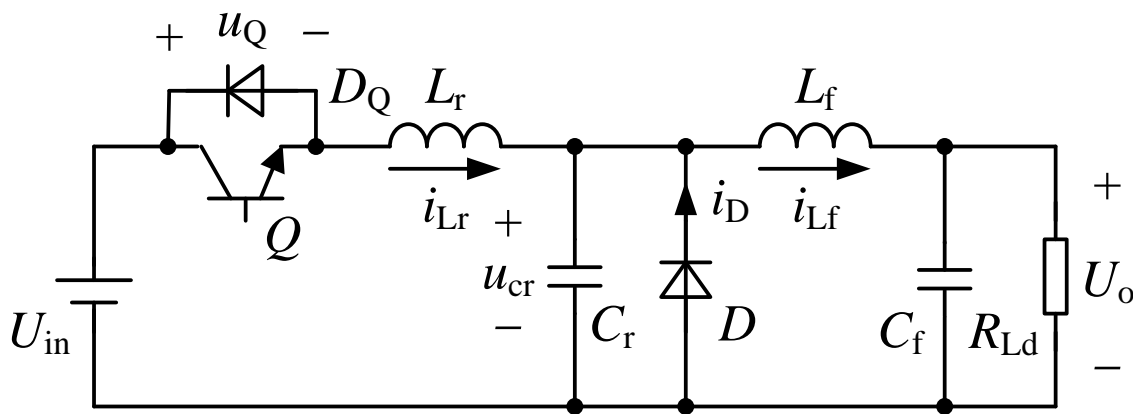
■ Buck ZCS QRC 的工作原理

所有开关管、二极管均为理想器件；

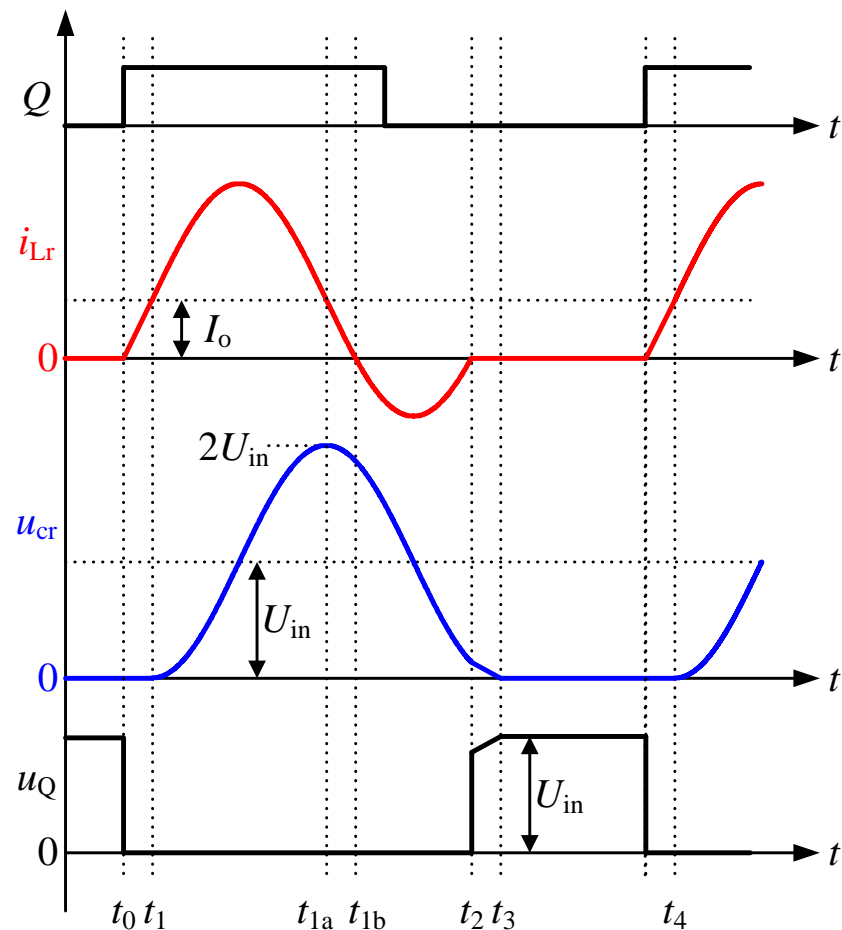
所有电感和电容均为理想元件；

滤波电感 L_f 远大于谐振电感 L_r ，即 $L_f \gg L_r$ ；

L_f 足够大，其电流近似等于输出电流。



Buck ZCS QRC 电路图



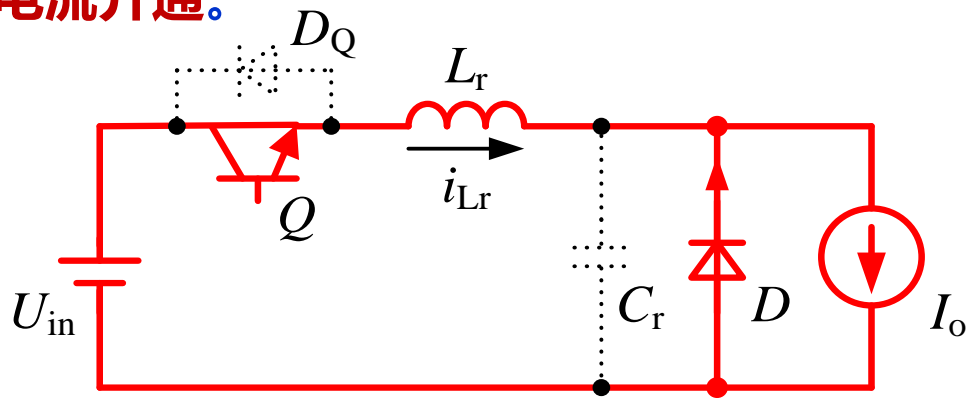
Buck ZCS QRC 的主要波形图

零电流开关准谐振变换器

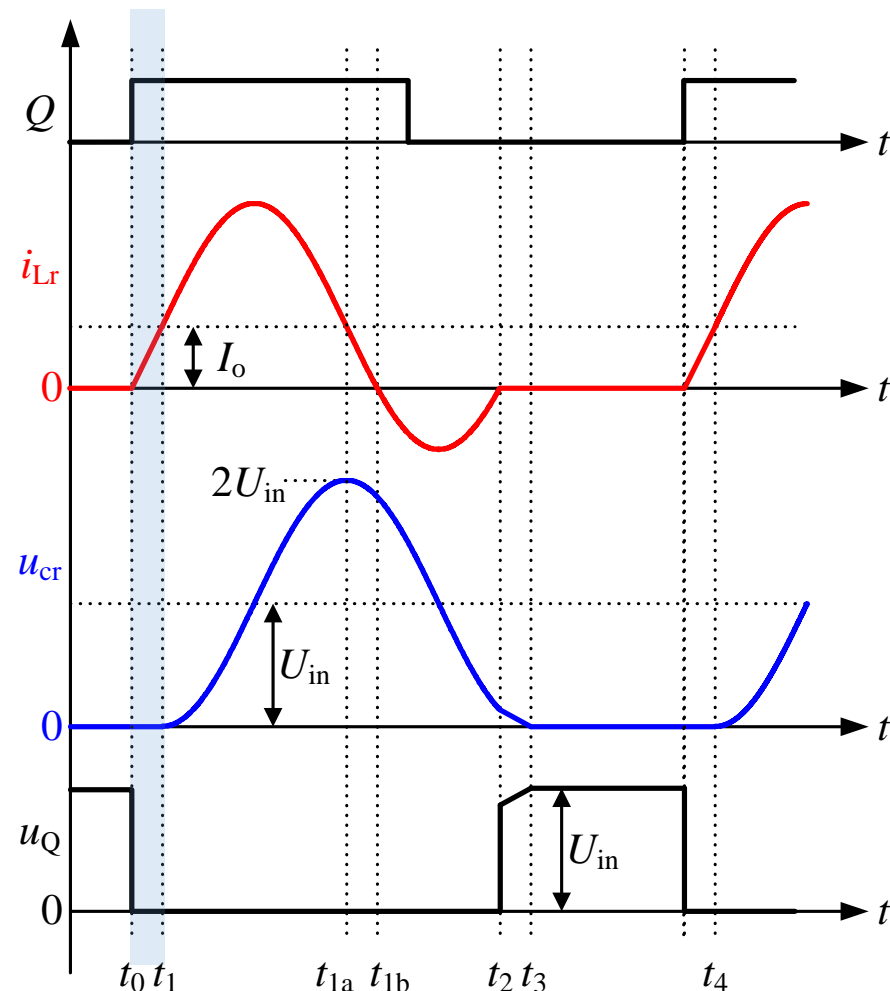
(1) 开关模态1 $[t_0, t_1]$

在 t_0 时刻之前，开关管处于关断状态， I_o 从二极管 D 流过；此时，谐振电感电流 i_{Lr} 为0，谐振电容电压 u_{cr} 也为0。

在 t_0 时刻，开关管开通， U_{in} 直接加在 L_r 上， L_r 的电流从零开始线性上升。由于 L_r 限制了电流的上升速度，因此是**零电流开通**。



(a) 全波模式开关模态 1 等效电路图



Buck ZCS QRC 的主要波形图

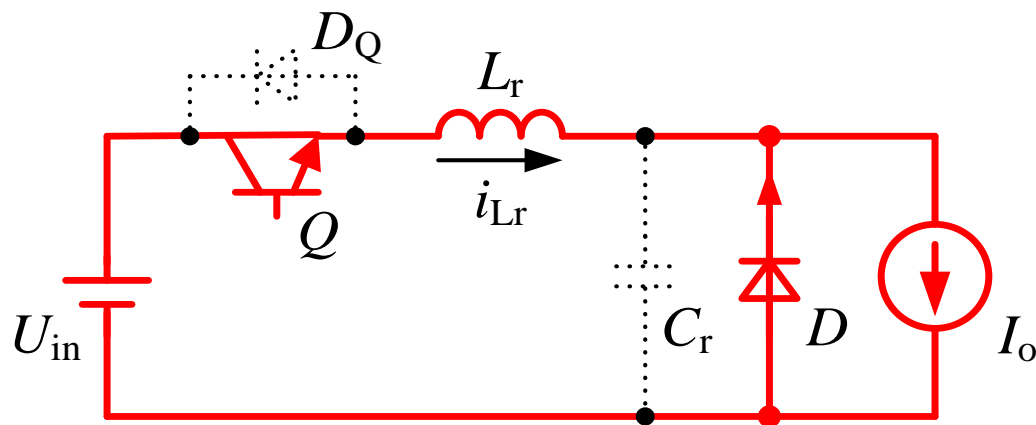
零电流开关准谐振变换器

(1) 开关模式1 $[t_0, t_1]$

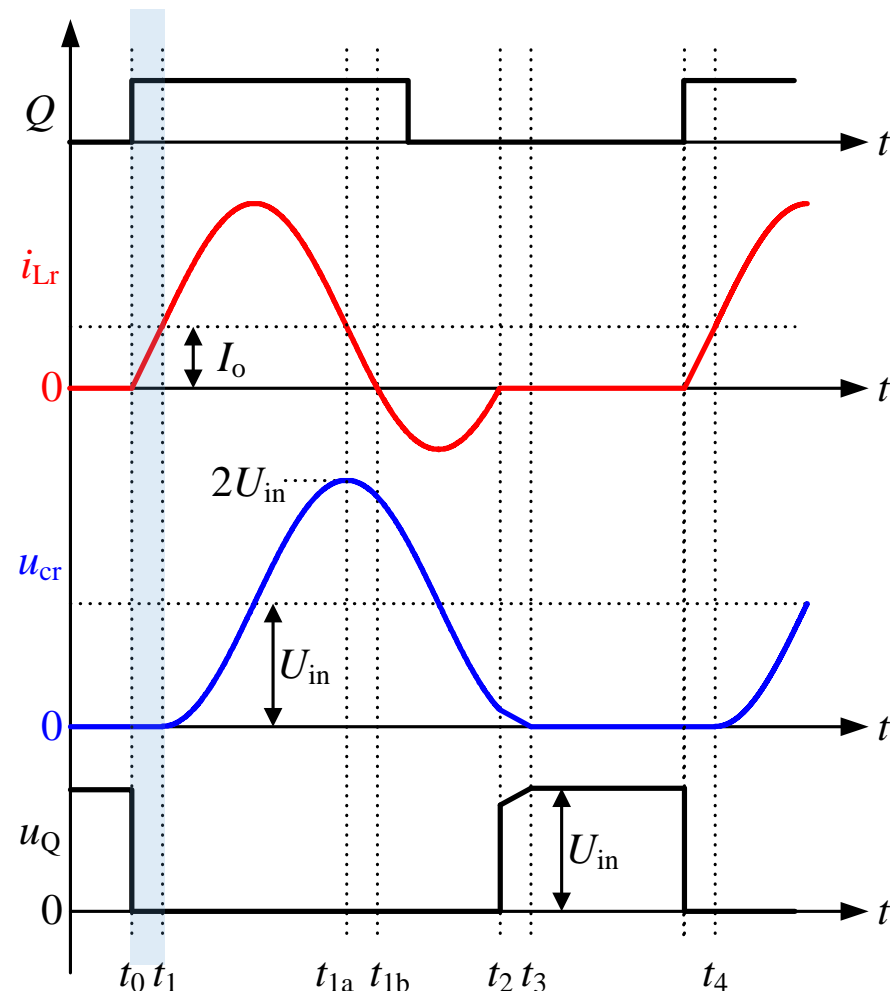
在此开关模式中，谐振电感电流 i_{Lr} 和二极管的电流 i_D 的表达式分别为：

$$i_{Lr}(t) = \frac{U_{in}}{L_r}(t - t_0)$$

$$i_D(t) = I_o - \frac{U_{in}}{L_r}(t - t_0)$$



(a) 全波模式开关模式 1 等效电路图



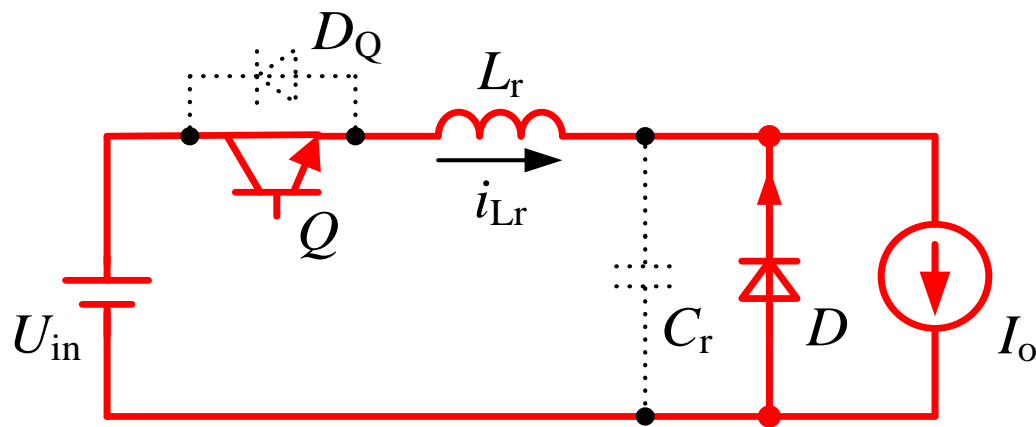
Buck ZCS QRC 的主要波形图

零电流开关准谐振变换器

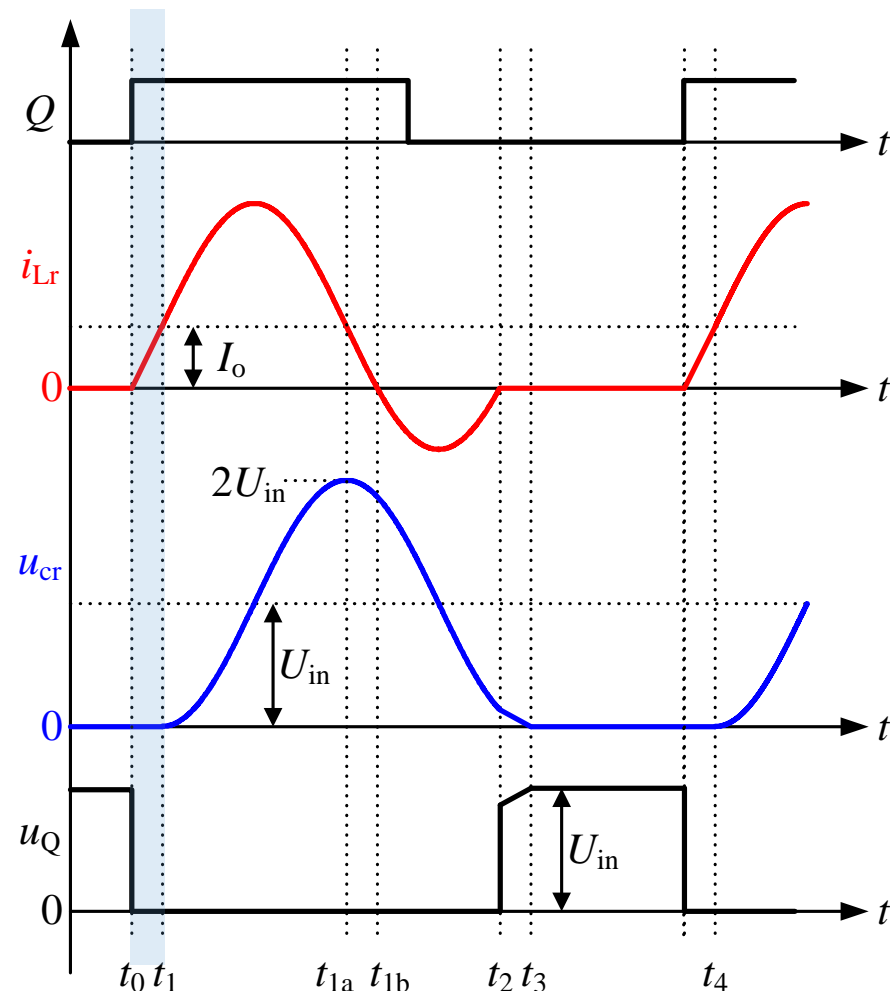
(1) 开关模式1 $[t_0, t_1]$

在 t_1 时刻, i_{Lr} 上升到 I_o , 此时 $i_D = 0$, 二极管 D 自然关断。开关模式1的持续时间为:

$$t_{01} = \frac{L_r I_o}{U_{in}}$$

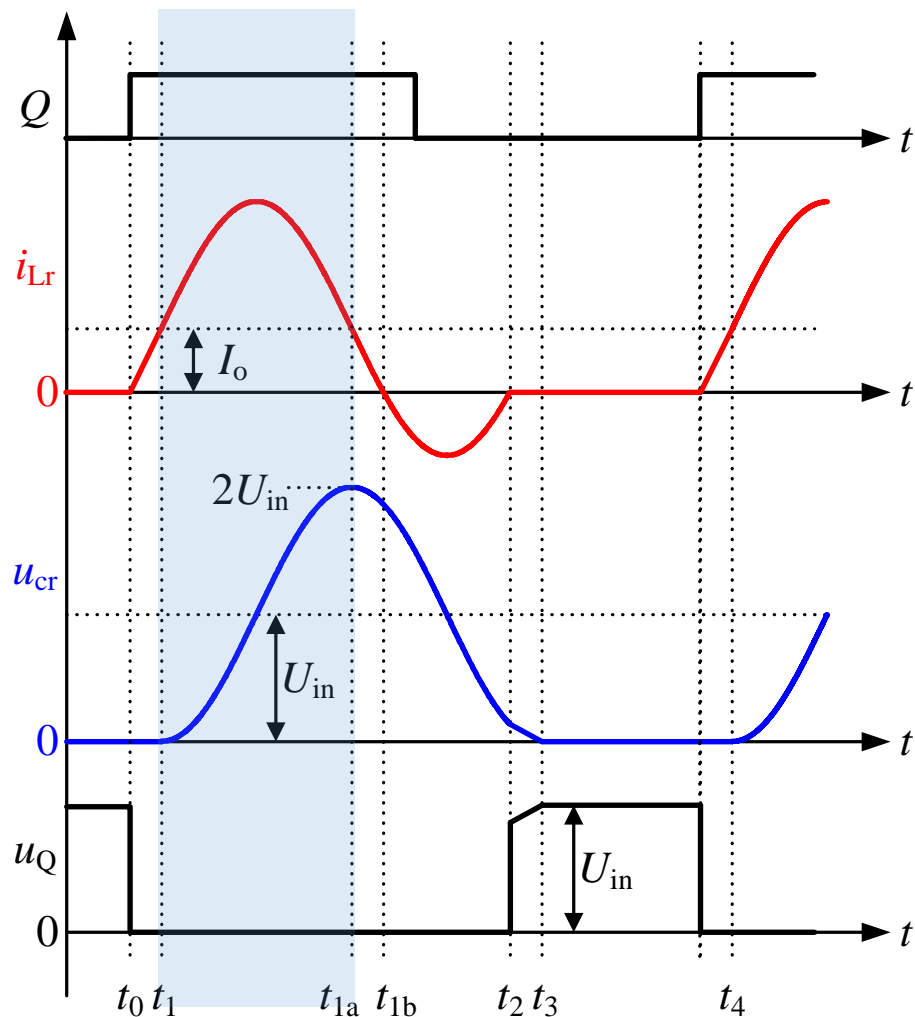


(a) 全波模式开关模式 1 等效电路图



Buck ZCS QRC 的主要波形图

零电流开关准谐振变换器



Buck ZCS QRC 的主要波形图

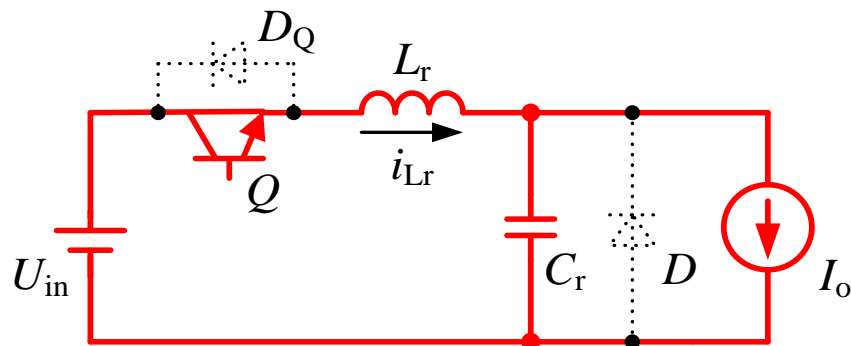
(2) 开关模式2 $[t_1, t_2]$

从 t_1 时刻开始, L_r 和 C_r 开始谐振工作, L_r 的电流和 C_r 的电压的表达式分别为:

$$i_{Lr}(t) = I_o + \frac{U_{in}}{Z_r} \sin \omega_r (t - t_1)$$

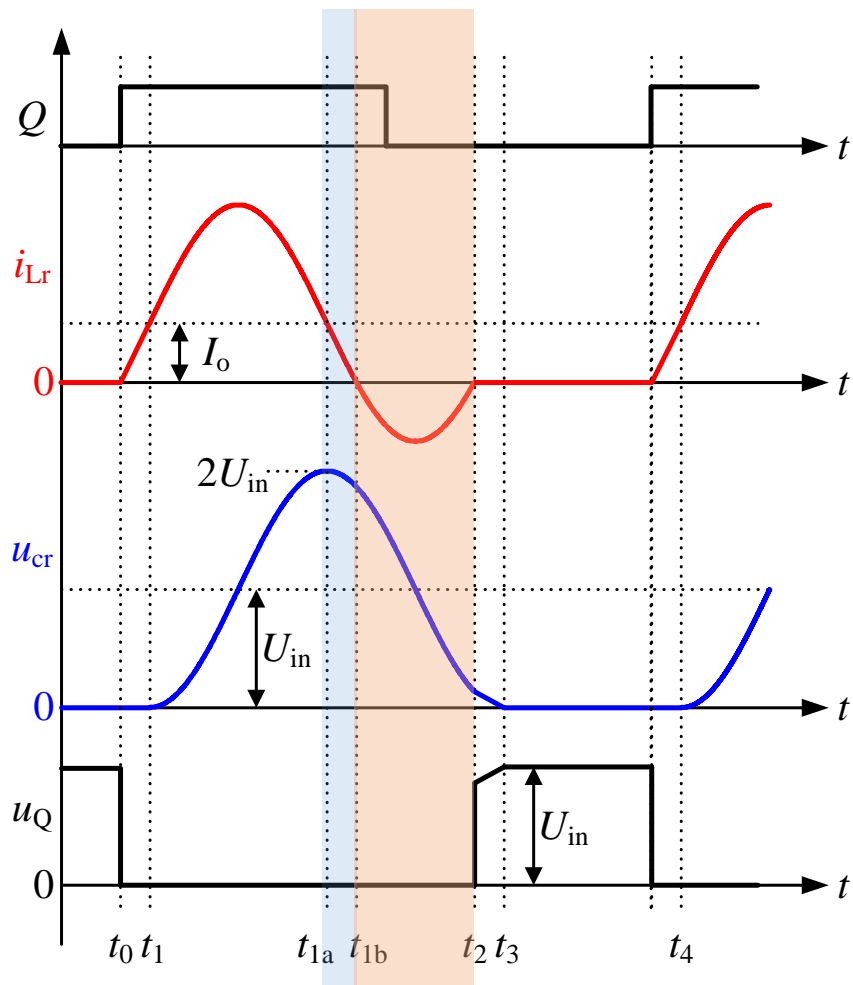
$$u_{cr}(t) = U_{in} [1 - \cos \omega_r (t - t_1)]$$

式中, $\omega_r = 1/\sqrt{L_r C_r}$, 为谐振角频率; $Z_r = \sqrt{L_r/C_r}$ 为谐振电感和谐振电容的特征阻抗。



(b) 全波模式开关模式 2 等效电路图

零电流开关准谐振变换器



Buck ZCS QRC 的主要波形图

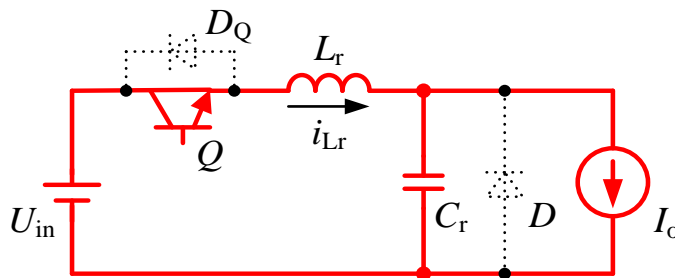
(2) 开关模式2 $[t_1, t_2]$

在 t_{1a} 时刻, i_{Lr} 减小到 I_o , 而 u_{cr} 达到最大值 $2U_{in}$ 。

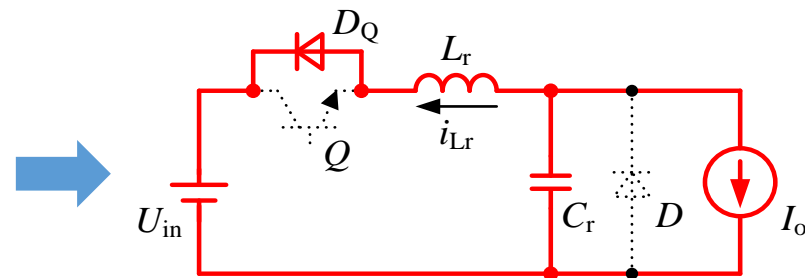
i_{Lr} 继续减小, C_r 开始放电, 其电压下降。

t_{1b} 时刻, i_{Lr} 减小到 0, 此时反并二极管 D_Q 导通, i_{Lr} 开始反方向流动。

t_2 时刻, i_{Lr} 再次减小到 0。在 $[t_{1b}, t_2]$ 时段, D_Q 导通, Q 中的电流为零, 这时关断 Q , 则 Q 是**零电流关断**。

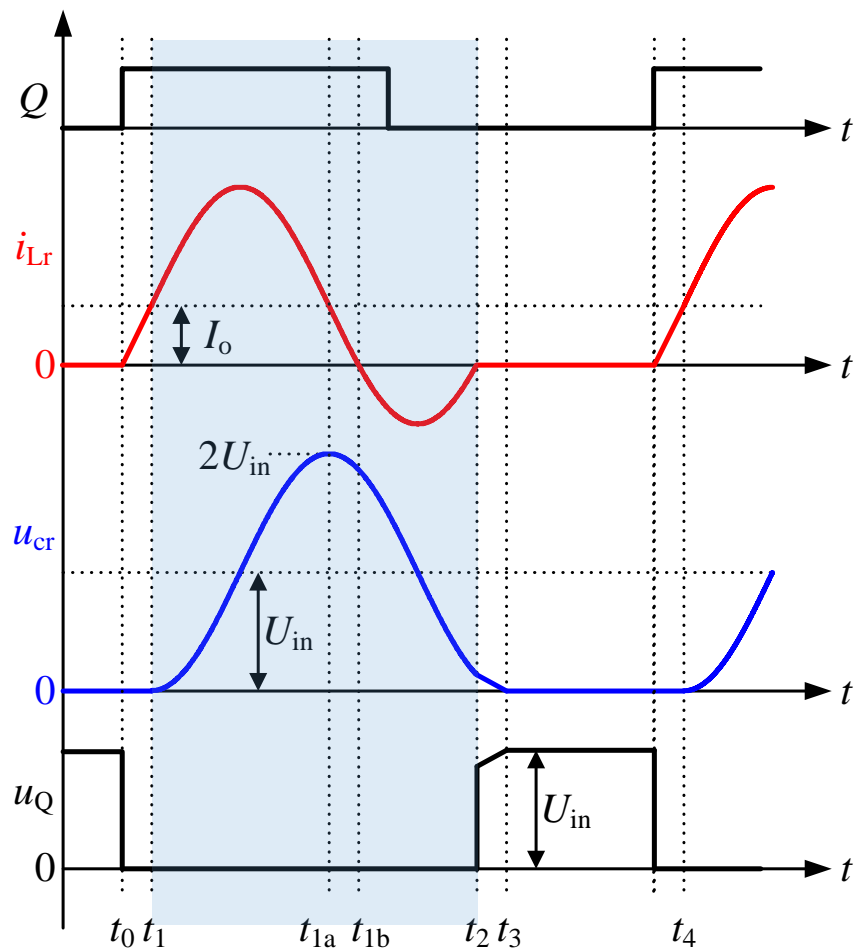


(b) 开关模式 2 等效电路图



(c) 开关模式 2 等效电路图

零电流开关准谐振变换器



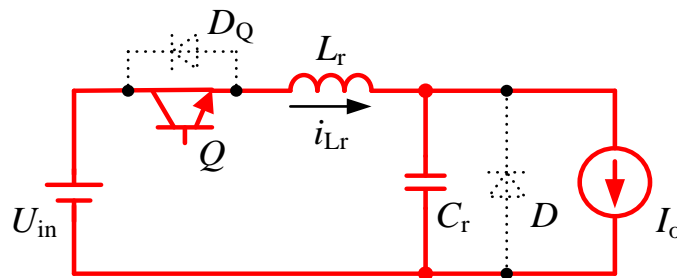
Buck ZCS QRC 的主要波形图

(2) 开关模式2 $[t_1, t_2]$
 t_2 时刻, 谐振电容电压为:

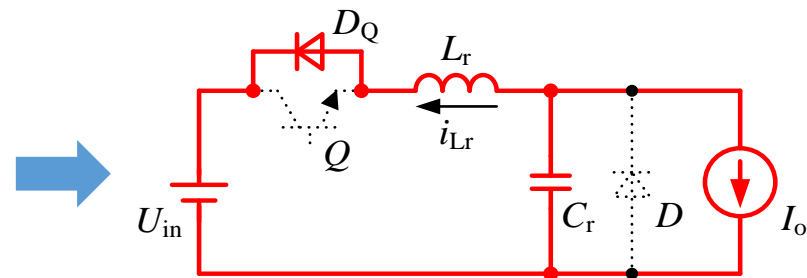
$$U_{cr}(t_2) = U_{in} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{Z_r I_o}{U_{in}} \right)^2} \right]$$

开关模式2 的持续时间为:

$$t_{12} = \frac{1}{\omega_r} \left[2\pi - \sin^{-1} \left(\frac{Z_r I_o}{U_{in}} \right) \right]$$

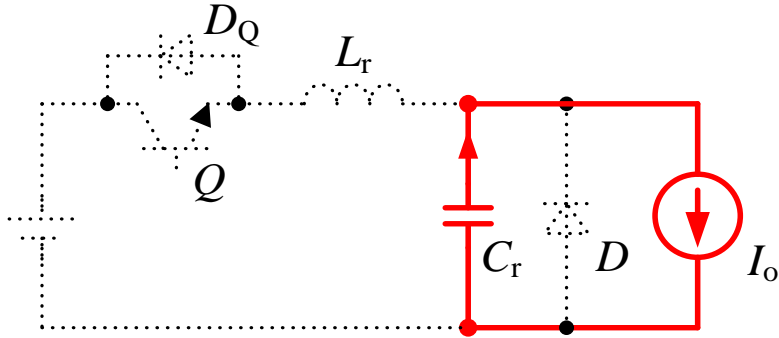


(b) 开关模式 2 等效电路图



(c) 开关模式 2 等效电路图

零电流开关准谐振变换器



(d) 全波模式开关模式 3 等效电路图

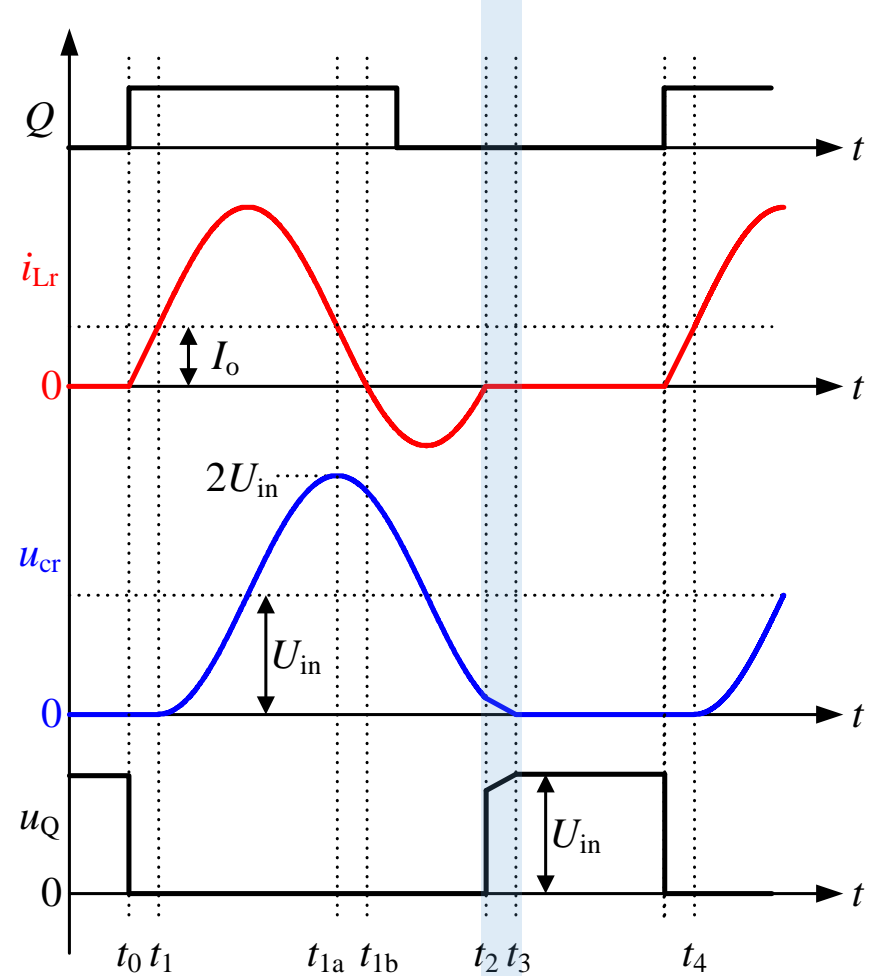
(3) 开关模式3 $[t_2, t_3]$

在此开关模式中，由于 $i_{Lr} = 0$ ，滤波电感电流 I_o 全部流过谐振电容，电容放电，其电压 u_{cr} 的表达式为：

$$u_{cr}(t) = U_{cr}(t_2) - \frac{I_o}{C_r}(t - t_2)$$

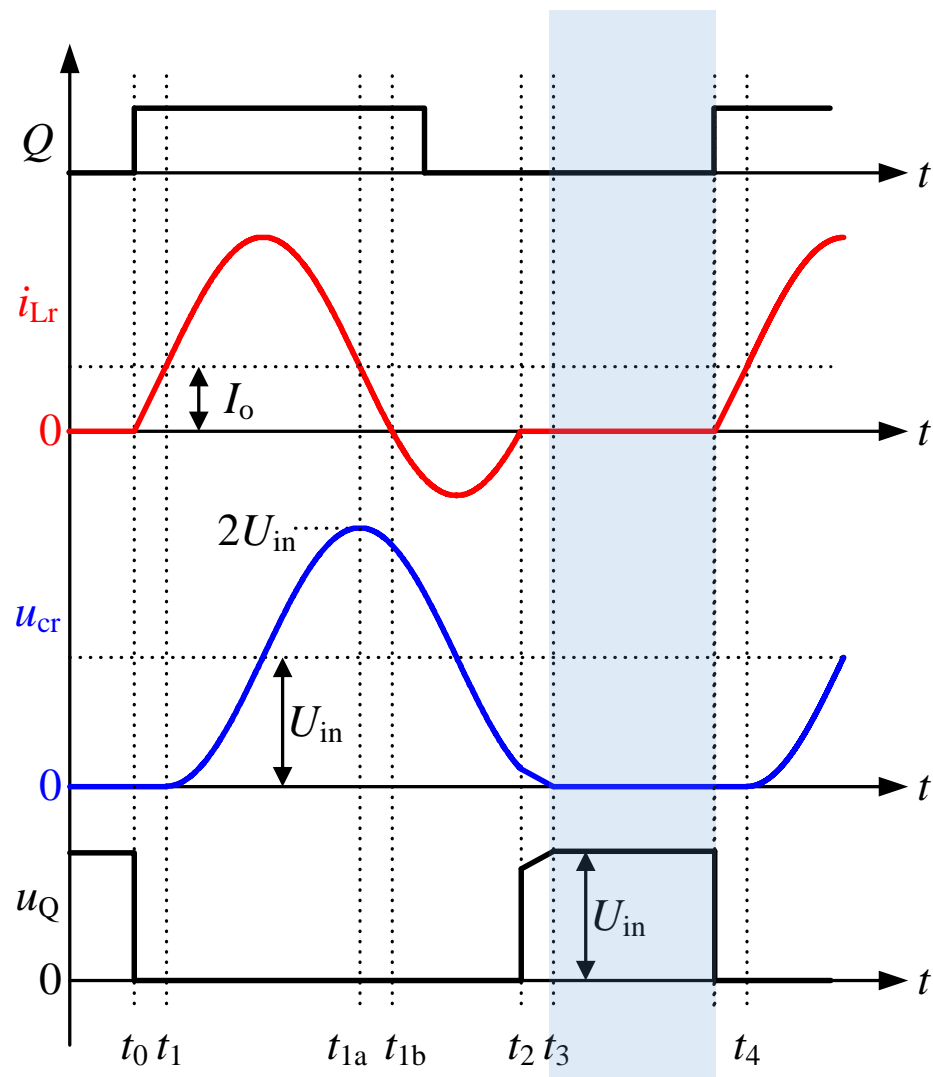
在 t_3 时刻， u_{cr} 减小到 0，二极管 D 导通。此开关模式的持续时间为：

$$t_{23} = \frac{C_r U_{cr}(t_2)}{I_o}$$

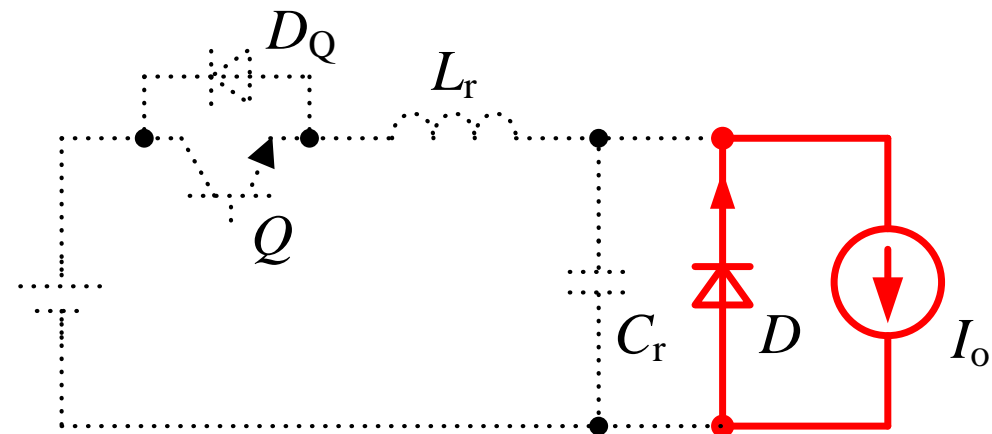


Buck ZCS QRC 的主要波形图

零电流开关准谐振变换器



Buck ZCS QRC 的主要波形图



(e) 开关模式 4 等效电路图

(4) 开关模式4 $[t_3, t_4]$

在此开关模式中，滤波电感电流 I_o 经过续流二极管 D 续流。在 t_4 时刻，零电流开通 Q ，开始下一个开关周期。

零电流开关准谐振变换器

■ 参数设计

(1) L_r 和 C_r 的计算

L_r 和 C_r 的设计取决于它的谐振频率 f_r 及最大输出电流 I_{omax} 。

要实现开关管的零电流开关, i_{Lr} 必须在开关管关断前减小到 0。

L_r 和 C_r 谐振工作时的 L_r 电流表达式:

$$i_{Lr}(t) = I_o + \frac{U_{\text{in}}}{Z_r} \sin \omega_r(t - t_1) \Rightarrow U_{\text{in}} / Z_r > I_{\text{omax}} \Rightarrow Z_r < U_{\text{in}} / I_{\text{omax}} \quad Z_r = \sqrt{L_r / C_r}$$

谐振频率的表达式为:

$$f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$$

由此可以计算得到 L_r 和 C_r 。



零电流开关准谐振变换器

■ 参数设计

(2) 开关管和二极管的电压和电流应力

谐振电感的最大电流为： $I_{Lrmax} = I_{omax} + U_{in} / Z_r$

将 $U_{in} / Z_r > I_{omax}$ 代入上式，可得 $I_{Lrmax} > 2I_{omax}$ 。从谐振电容电压表达式可知，谐振电容的最大电压为 $U_{crmax} = 2U_{in}$ 。

根据上面的分析，可以知道：

- 开关管 Q 中流过的最大电流为 $2I_{omax}$ ，它所承受的最大正向电压为 U_{in} 。
- 续流二极管 D 中所流过的最大电流为 I_{omax} ，所承受的最大反向电压为 $2U_{in}$ 。



零电流开关准谐振变换器

■ 电压传输比

该变换器的输入功率 P_{in} 为：

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} U_{in} i_{in} dt = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} U_{in} i_{Lr} dt \\ &= \frac{1}{T_s} \left[\int_{t_0}^{t_1} U_{in} \frac{U_{in}}{L_r} (t - t_0) dt + \int_{t_1}^{t_2} U_{in} \left(I_o + \frac{U_{in}}{Z_r} \sin \omega_r (t - t_1) \right) dt \right] \\ &= \frac{U_{in}}{T_s} \left[\frac{U_{in} t_{01}^2}{2L_r} + I_o t_{12} + \frac{U_{in}}{\omega_r Z_r} (1 - \cos \omega_r t_{12}) \right] \end{aligned}$$

又可知：

$$t_{01} = \frac{L_r I_o}{U_{in}} \quad t_{12} = \frac{1}{\omega_r} \left[2\pi - \sin^{-1} \left(\frac{Z_r I_o}{U_{in}} \right) \right]$$

可得：

$$P_{in} = \frac{U_{in}}{T_s} \left\{ \frac{L_r I_o^2}{2U_{in}} + \frac{I_o}{\omega_r} \left[2\pi - \sin^{-1} \left(\frac{Z_r I_o}{U_{in}} \right) \right] + C_r U_{in} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{Z_r I_o}{U_{in}} \right)^2} \right] \right\}$$

零电流开关准谐振变换器

■ 电压传输比

$$P_{\text{in}} = \frac{U_{\text{in}}}{T_s} \left\{ \frac{L_r I_o^2}{2U_{\text{in}}} + \frac{I_o}{\omega_r} \left[2\pi - \sin^{-1} \left(\frac{Z_r I_o}{U_{\text{in}}} \right) \right] + C_r U_{\text{in}} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{Z_r I_o}{U_{\text{in}}} \right)^2} \right] \right\}$$

如果忽略变换器的损耗，那么变换器的输入功率 P_{in} 与输出功率 P_o 相等，即可以得到 $P_{\text{in}} = P_o = U_o I_o$ 。定义电压传输比 $X = U_o / U_{\text{in}}$ ， $\gamma = R_{\text{Ld}} / Z_r$ ，其中 R_{Ld} 是负载电阻，而 $I_o = U_o / R_{\text{Ld}}$ ，那么由上式可得：

$$X = \frac{1}{2\pi} \frac{f_s}{f_r} \left[2\pi + \frac{X}{2\gamma} - \sin^{-1} \frac{X}{\gamma} + \frac{\gamma}{X} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{X^2}{\gamma^2}} \right) \right]$$

式中， $f_r = \omega_r / (2\pi)$ ，为谐振频率； $f_s = 1 / T_s$ ，为开关频率。

利用计算软件，可以计算出当 $X/\gamma \in (0, 1)$ 时，上式等号右边中括号内的式子近似等于 2π ，这样上式可简化为：

$$\frac{U_o}{U_{\text{in}}} = \frac{f_s}{f_r}$$



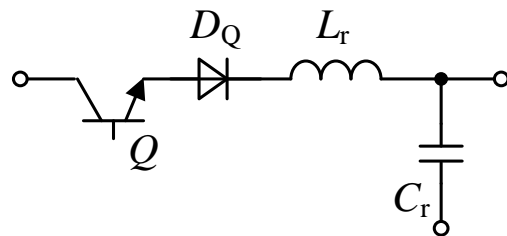
零电流开关准谐振变换器

■ 全波模式与半波模式的比较

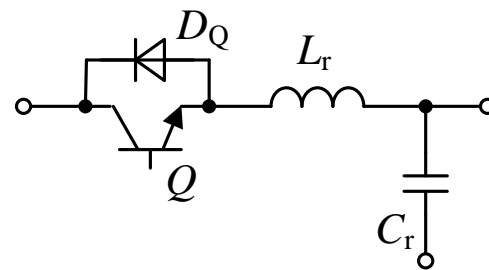
第8.2.1节提到过，零电流谐振开关有半波模式和全波模式两种。

对于 ZCS QRCs，**全波模式优于半波模式**，这是因为：

- (1) 半波模式的电压传输比与负载关系较大，而全波模式的**电压变换比基本与负载无关**，这种特性**有利于电路闭环系统的稳定工作**；
- (2) 在半波模式中，二极管 D 与开关管 Q 串联，存在通态损耗，使变换器的效率有所降低，而全波模式中二极管 D 与开关管 Q 反并联，**不存在额外的通态损耗**；
- (3) 一般商用的功率开关器件中，均集成有反并二极管 D ，不用再外接二极管，这样可以**降低成本**。



(a) 半波模式



(b) 全波模式