

它们之间的异同如下表：

	双极性	单极性	单极性倍频
高频工作开关管数量	4	2	4
输出脉冲频率	开关频率	开关频率	两倍开关频率
脉冲电压变化量	$2U_{in}$	U_{in}	U_{in}
载波极性	双极性	单极性	双极性

6-11 基于 SPWM 控制的逆变器输出波形中的谐波与哪些因素有关？

答：与 SPWM 的调制策略，开关频率、调制波的正弦度等有关。

第 7 章 开关管的缓冲电路

7-1 请分析考虑开关管寄生参数（即开关不是理想器件）时，Buck 变换器开关模态及等效电路，并画出开关管和二极管的电压电流波形。

答：如图 7-1 和 7-2 所示。

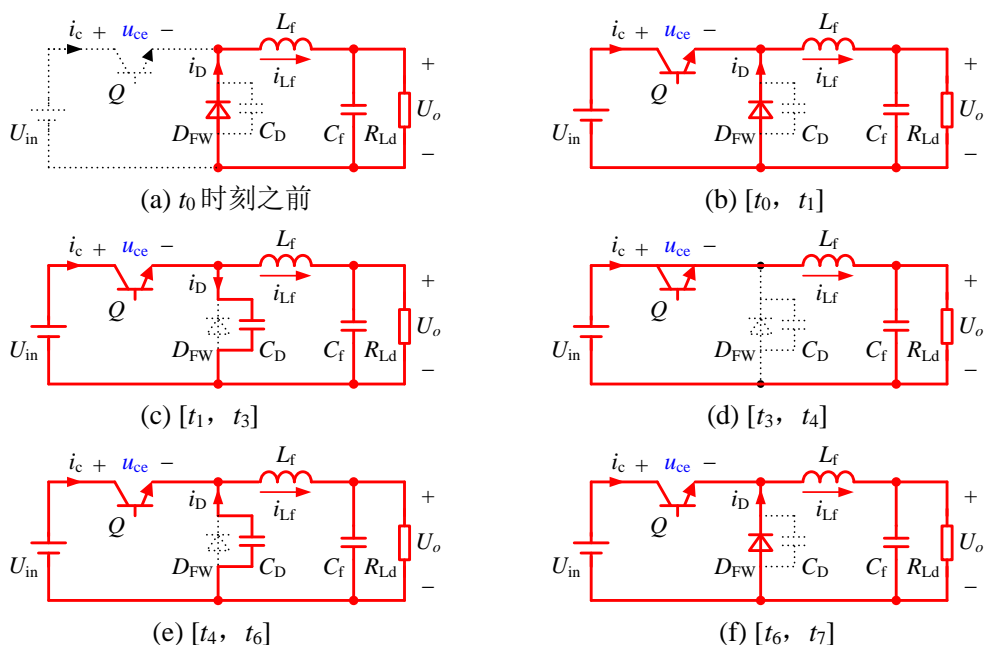


图 7-1

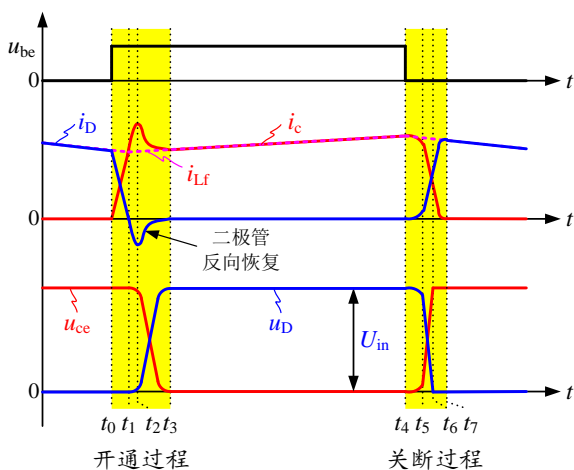


图 7-2 开关管的主要波形

7-2 缓冲电路的作用是什么？直流变换器的基本缓冲电路有哪些？它们之间有什么区别。

答：（1）缓冲电路的作用是改变开关管的电压或电流变化轨迹，减小开关管开通或关断时的交叠区，从而转移或者减小开关损耗，降低电压和电力变化率，减小 EMI。

（2）RCD 缓冲电路：减小开关管的关断损耗；

RLD 缓冲电路：减小开关管的开通损耗。

7-3 请在图 7.17 所示的 Buck 电路中加上 RCD 缓冲电路，并请简要说明其工作原理。

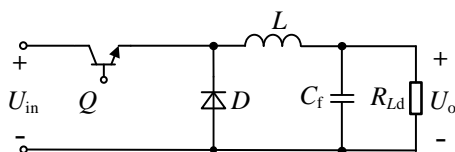
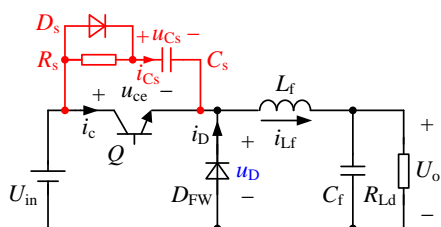
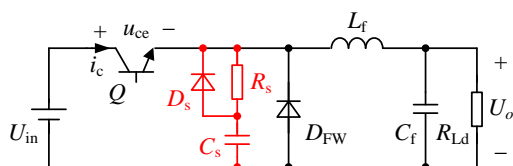


图 7.17

答：（1）如图解 7-3 或 7-4。



图解 7-3

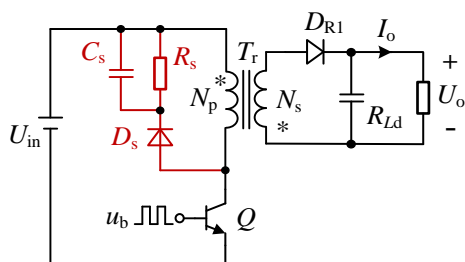


图解 7-4

（2）以图解 7-3 为例，其工作原理详见 7.2.1.2 节。

7-4 请思考反激变换器如何加入 RCD 缓冲电路？并请简要分析其工作原理。

答：（1）如图解 7-5。



图解 7-5

（2）工作原理如下：

a) 当开关管 Q 开通时，原边绕组 N_p 承受输入电压，漏感存储能量。RCD 缓冲电路二极管 D_s 承受反压截止，电容 C_s 上的能量通过电阻 R_s 放电。在 Q 关断期间，

电容 C_s 电压下降。

b) 当开关管 Q 关断时, 若无 RCD 缓冲电路, 由于存在漏感, 关断时有较大电压尖峰。当加入 RCD 缓冲电路后, 当开关电压 Q 上升到超过输入电压时, 二极管 D_s 正偏导通, 此时漏感能量同时给结电容和 C_s 充电。由于 C_s 远大于结电容, 故电压尖峰上升率低, 尖峰小。当漏感能量吸收完成后, C_s 将开始下降。若 RC 取值合理, 在 Q 再次开通前, 电容 C_s 的电压应下降到副边折射回原边的电压附近, 即 $(N_p/N_s)*U_o$ 。

7-5 请分析 RCD 缓冲电路中缓冲电容 C_s 和缓冲电阻 R_s 的设计要求。

答: 缓冲电容应折衷选取, 一般按照满载时 u_{ce} 上升到 U_{in} 的时间为开关管电流下降时间的 3~5 倍来选取, 即:

$$T_{rise} = C_s U_{in} / I_o = (3 \sim 5) t_f$$

t_f 为开关管关断时电流的下降时间。

$$C_s = (3 \sim 5) I_o t_f / U_{in}$$

为了保证缓冲电容电压下降到零, 应该满足:

$$(3 \sim 5) \tau_{RC} < T_{on}$$

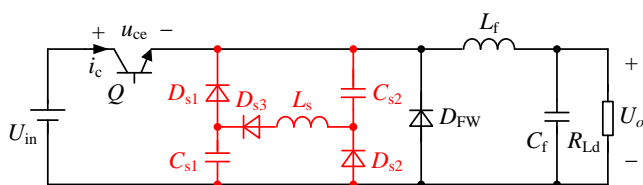
由此可得:

$$R_s < \frac{T_{on}}{(3 \sim 5) C_s}$$

7-6 请简要叙述 RLD 缓冲电路中缓冲电感 L_s 和缓冲电阻 R_s 的选取要求。

答: 为了减小缓冲电阻的损耗, 缓冲电感量不宜太大, 一般按照满载时 i_c 上升到滤波电感电流的时间为开关管开通时电压下降时间的 3~5 倍来选取。为了保证缓冲电感的缓冲作用, 应该在开关管关断期间使其电流下降到零, 这就决定了缓冲电阻的最小值。缓冲电阻应该尽量按照最小值选取, 因为缓冲电阻越小, 开关管关断时的电压尖峰就越小。

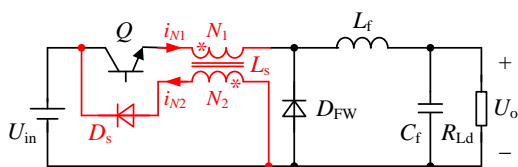
7-7 请在图 7.17 所示的 Buck 电路中加上无损关断缓冲电路, 并分析其工作原理。



图解 7-7

工作原理：详见教材 7.3.1.2 节。

7-8 请在图 7.17 所示的 Buck 电路中加上无损开通缓冲电路，并分析其工作原理。



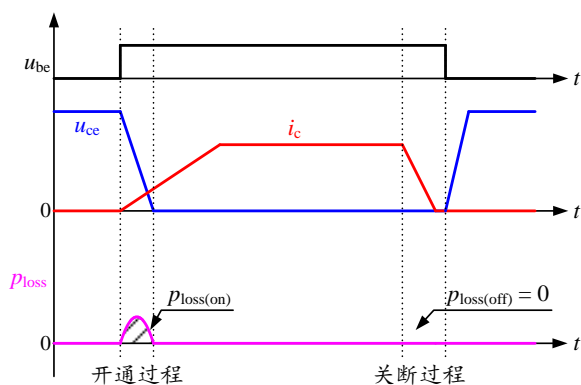
图解 7-8

工作原理：详见教材 7.3.2.2 节。

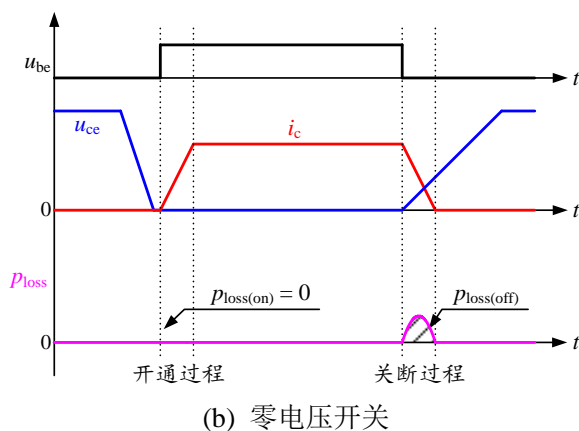
第 8 章 直流变换电路的软开关技术

8-1 请画出零电压开关和零电流开关的电压和电流波形图，并分析两者的特点。

答：如图解 8-1 所示。



(a) 零电流开关



图解 8-1 软开关时开关管的电压和电流波形

零电流开关特点：在开关管开通时，限制其电流的上升率，使其缓慢上升，减小了电流和电压交叠区内电流的大小；而在开关管关断前，使其电流减小到零，从而完全消除关断损耗；

零电压开关特点：在开关管开通前，使其电压下降到零，从而完全消除关断损耗；而在开关管开通时，限制其电压的上升率，使其缓慢上升，减小了电流和电压交叠区内电压的大小；

因此，零电流开关主要控制流过开关管的电压变化情况，而零电压开关主要控制开关管两端电压的变化情况。

8-2 单管直流变换器的软开关方法有哪几种，各有什么特点。

答：

单管直流变换器的软开关有以下几种：

- 1) 准谐振变换器：这类变换器的特点是，在一个开关周期中，谐振元件参与能量变换的某一个阶段，不是全程参与。QRCs 分为 ZCS 和 ZVS 两类。这类变换器需要采用频率调制方法。
- 2) 零开关脉宽调制变换器：它们是在 QRCs 的基础上，加入一个辅助开关管，将谐振元件的谐振过程分为两个阶段，一个用来实现零电压开通(或零电流开通)，另一个实现零电压关断(或零电流关断)。加入辅助开关管后，变换器可以实现 PWM 控制。与 QRCs 不同的是，谐振元件的谐振工作时间应该比开关周期短的多，一般为开关周期的 $1/10 \sim 1/5$ 。零开关 PWM 变换器也可分为 ZCS PWM 变换器和 ZVS PWM 变换器。
- 3) 零转换 PWM 变换器：与零开关 PWM 变换器一样，这类变换器也是工作在

PWM 方式。不同的是，其辅助谐振电路只是在主开关管开关时工作很短一段时间，以实现其软开关，其它时间则停止工作，这样辅助谐振电路的损耗很小。

零转换 (Zero-Transition) PWM 变换器可分为零电压转换 (Zero-Voltage-Transition, ZVT) PWM 变换器和零电流转换 (Zero-Current-Transition, ZCT) PWM 变换器，不过 ZCT PWM 变换器应用较少。

8-3 请比较准谐振变换器与零电压转换 (ZVT) PWM 变换器的优缺点。

答：

1) 准谐振变换器中，谐振电感和谐振电容一直参与能量传递，开关管和谐振元件的电压应力和电流应力较大。而且，准谐振变换器需要采用频率调制方法，由于开关频率是变化的，其变压器、输入滤波器和输出滤波器不易优化设计。

2) 零电压 (ZVT) 变换器的特点有：① 采用 PWM 控制方式，实现恒定频率控制；② 辅助电路只是在开关管开关时工作，其他时候不工作，辅助电路损耗小；③ 辅助电路不是串联在主功率回路中，而是与主功率回路并联，减小了辅助电路的损耗；④ 辅助电路的工作，不会增加主开关管的电压和电流应力。

8-4 如图 8.31 所示的 Buck 电路，输出电感 L_f 足够大，一个开关周期内电流基本保持不变。

- (1) 若要将其变为全波模式的零电流开关准谐振变换器 (ZCS QRC)，需要增加哪些元件？请在图中补充。
- (2) 若输入电压为 U_{in} ，请画出该变换器谐振电感电流、二极管 D 电流、谐振电容电压、开关管 Q 两端电压的波形，并标出幅值大小。
- (3) 结合主要波形，分析该电路的基本工作原理。
- (4) 若要对输出电压进行控制，该电路通常采用何种调制方式，为什么？

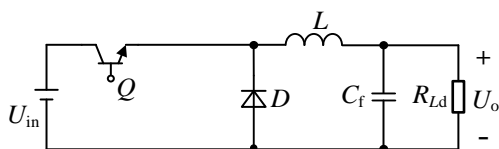
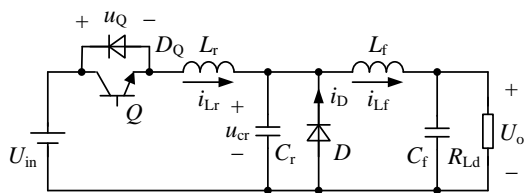


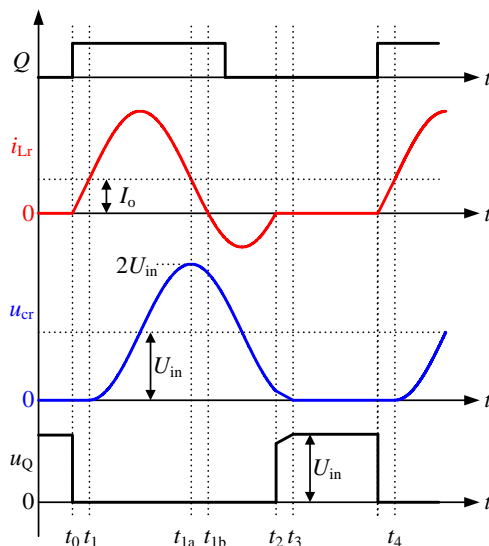
图 8.31

答：(1) 需要增加谐振电感、电容和一个反并联二极管。完整电路图如图解 8-2 所示。



图解 8-2 Buck ZCS-QRC 电路图

(2) 如图解 8-3 所示



图解 8-3 Buck ZCS QRC 的主要波形图

(3) 略，详见教材 8.2.2;

(4) 采用 FPM 方法，即通过调节变换器的开关频率来调节输出电压。

8-5 如图 8.32 所示的零电压开关准谐振 Buck 电路。输入电压为 40V，输出电压为 20V，负载电流变化范围为 5~15A，若谐振电容 C_r 取为 20nF。试计算：

- (1) 保证最小负载电流条件下实现 ZVS，谐振电感 L_r 的取值。
- (2) 在上述条件下，计算开关管承受的最大电压。

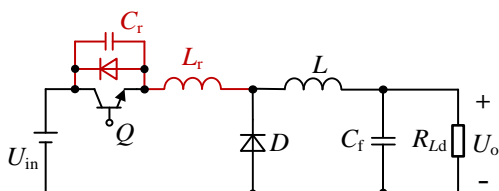


图 8.32

答：

- (1) 零电压开关准谐振电路实现软开关的条件：

$$L_r \geq C_r \left(\frac{U_{in}}{I_{Lmin}} \right)^2 = 1.28 \mu H$$

- (2) 通过求解 u_{Cr} 的最大值便可得到 u_{Cr} 的谐振峰值表达式，这一谐振峰值就是开关管 Q 承受的峰值电压。该表达式在负载电流最大时有最大值，即

$$U_{Q_max} = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} I_{Lmax} + U_{in} = 160(V)$$

8-6 如图 8.33 所示的 Boost 电路，假设升压电感 L_b 足够大，一个开关周期内电流基本保持不变，输出电容 C_f 也足够大，一个开关周期内输出电压基本不变。

- (1) 若要将其变为半波模式零电压开关准谐振变换器，需增加哪些元件？请在图中补充。
- (2) 若输入电压为 U_{in} ，电流为 I_{in} ，请画出该变换器谐振电感电流、谐振电容电压、开关管 Q 电流波形，并标出幅值大小。
- (3) 结合主要波形，分析该电路的基本工作原理。
- (4) 与全波模式相比，半波模式有什么优势？

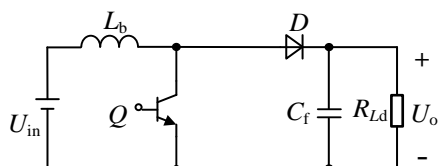
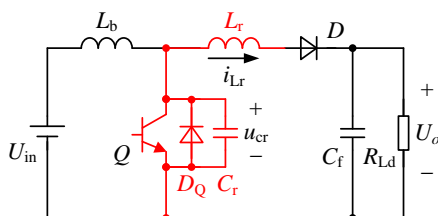


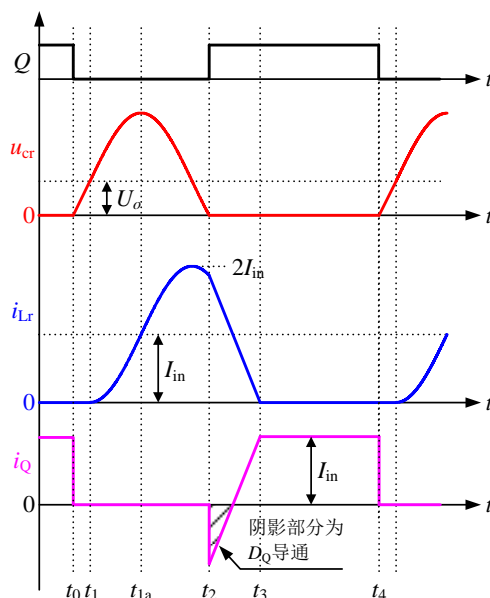
图 8.33

答：(1) 需要增加谐振电感、电容和一个反并联二极管。完整电路图如图解 8-4 所示。



图解 8-4 Boost ZVS QRC 电路图

- (2) 如图解 8-5 所示



图解 8-5 Boost ZVS QRC 的主要波形

(3) 略，详见教材 8.2.3；

(4) ① 半波模式中二极管 D 与开关管 Q 反并联，不存在额外的通态损耗；② 在商用功率开关器件中，一般都集成有反并二极管 D ，不用再外接二极管。

8-7 准谐振变换器为什么只适宜于变频方式下工作而不是恒频 PWM 方式？有什么不足？

答：

以 Buck ZCS QRC 为例，它的电压传输比 $U_o/U_{in} = f_s/f_r$ 。可见，输出电压与开关频率成正比关系，而与负载关系较小。为了获得所要求的输出电压，Buck ZCS QRC 需要采用脉冲频率调制方法，即通过调节变换器的开关频率来调节输出电压。

采用频率调制方法，开关频率是变化的，变换器的变压器、输入滤波器和输出滤波器难以优化设计。

8-8 请绘制 Buck、Boost、正激、反激零电压转换（ZVT）变换器的电路图。

答：它们的电路图如下：

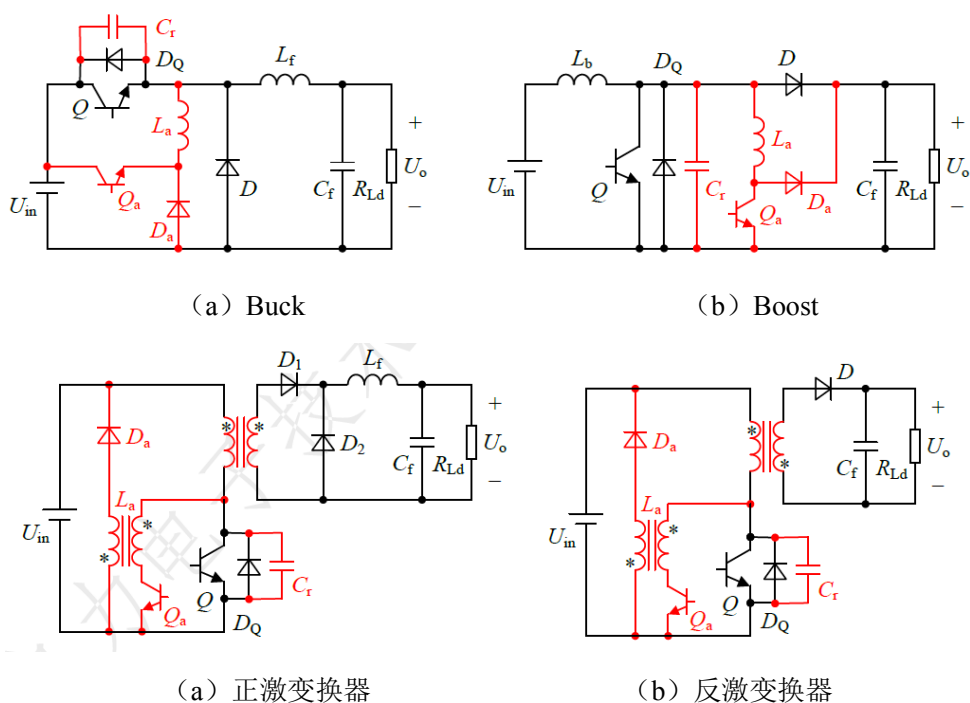


图 8-6 ZVT PWM 变换器

8-9 如图 8.17 所示的 Boost ZVT PWM 变换器。假设升压电感 L_b 足够大，一个开关周期内电流基本保持不变，输出电容 C_f 也足够大，开关周期内输出电压基本不变。

(1) 分析 ZVT PWM 变换器的基本思路。

(2) 若输出电压为 U_o ，输入电流为 I_{in} ，请绘制辅助电感电流 L_a 、开关管 Q 、续流二极管 D 的电流波形和谐振电容电压 C_r 、续流二极管 D 的端电压波形，并标出幅值大小。

答：(1) 略，详见教材；

(2) 如图 8-7 所示

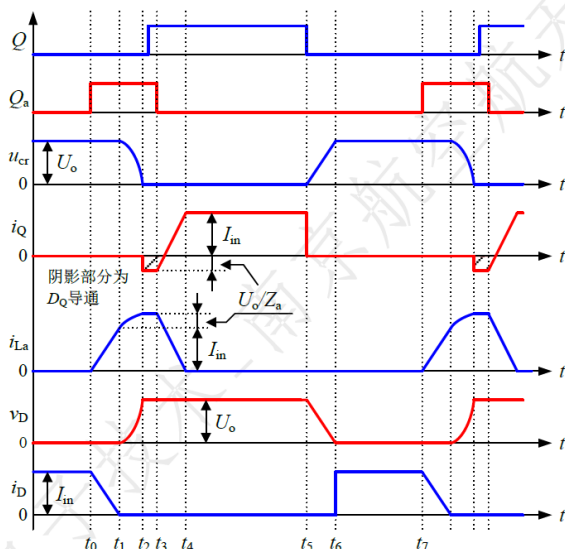


图 8-7 Boost ZVT PWM 变换器的主要波形图

8-10 如图 8.20 所示的全桥 LLC 谐振变换器。

- (1) 该变换器的传输比与哪些因素有关？请叙述它的输出电压调节机理。
- (2) 当 $f_N=1$ 时（即 $f_s=f_r$ ），变换器的电压传输比是否与负载有关，为什么？
- (3) 如图 8.28 所示的电压传输比曲线，以纯阻性曲线和 $f_N=1.0$ 直线为界，分为三个区域。请分别指出可实现开关管的 ZVS、ZCS 的区域。设计时选择哪个区域为宜，为什么？

答：

(1) 传输比与品质因数 Q ， λ 以及开关频率 f_s 有关。输出电压的调节，主要通过调节开关频率 f_s 来实现。

(2) 当 $f_N=1$ ，即 $f_s=f_r$ 时，变换器的输入输出电压传输比恒为 1，与负载无关。这是由于此时 L_r 和 C_r 支路的阻抗为零，输入电压相当于直接加在变压器原边，通过变压器传输到负载，与变换器各部分参数无关。

(3) 区域 1：在 $f_N=1$ 直线右侧，此时电压传输比 $M<1$ ，处于降压模式，变换器呈感性，开关管可以实现 ZVS，但是输出整流二极管是硬关断的。

区域 2：在 $f_N=1$ 的左侧且在纯阻性曲线右侧，此时电压传输比 $M>1$ ，处于升压模式，变换器呈感性，开关管可以实现 ZVS，输出整流二极管自然关断，实现了 ZCS。

区域 3：在 $f_N=1$ 的左侧且在纯阻性曲线左侧，此时变换器呈容性，开关管可以实现 ZCS 状态。

在参数设计时，尽量让变换器工作在 ZVS 状态，即图中区域 1 和区域 2。但在区域 1 中， $f_s > f_r$ ，副边整流二极管为硬关断，存在反向恢复损耗。因此，建议选择区域 2 为工作区域，此时变换器处于升压模式。

8-11 如图 8.29(a)所示为移相全桥变换器。假设 L_f 足够大，输出可等效为恒流源 I_o ，变压器变比为 K 。

- (1) 请阐述移相控制的基本原理。
- (2) 为什么超前桥臂比滞后桥臂更容易实现 ZVS?
- (3) 如果没有 L_r ，电路能否正常工作？此时哪些开关管仍可实现软开关？
- (4) 何为占空比丢失 (D_{loss})？分析 D_{loss} 产生的原因。 D_{loss} 的大小与哪些参数有关？

答：

- (1) 略，详见教材 8.5.1。
- (2) 这是因为超前桥臂开关过程中，输出滤波电感 L_f 折算到原边与谐振电感 L_r 串联，此时用来实现 ZVS 的能量是 L_r 和 L_f 的能量之和。一般来说， L_f 很大，在超前桥臂开关过程中，其电流近似不变，类似于一个恒流源，这个能量很容易满足 ZVS 条件。而对于滞后桥臂，输出滤波电感 L_f 不参与其中 ZVS 的实现，而且谐振电感比折算到原边的输出滤波电感要小得多，故不易实现 ZVS。
- (3) 电路是能够正常工作的。此时只有超前桥臂的开关管可以实现 ZVS。
- (4) 副边占空比丢失，就是说副边的占空比 D_{sec} 小于原边的占空比 D_p ，即： $D_{sec} < D_p$ ，其差值就是副边占空比丢失 D_{loss} 。

副边占空比丢失的原因：在原边电流 i_p 从正向(或负向)变化到负向(或正向)负载电流的时间段内，虽然原边桥臂间电压 u_{AB} 有正电压方波(或负电压方波)，但原边不足以提供负载电流，副边整流桥的所有二极管导通，输出滤波电感电流处于续流状态，输出整流后的电压 u_{rect} 为零。这样副边就丢失了一部分电压方波。

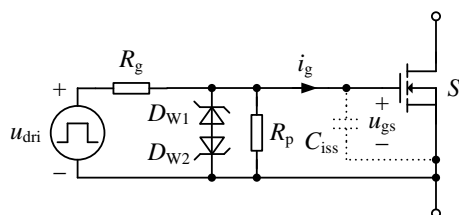
D_{loss} 的大小与 L_r 、负载电流 I_o 和有关 U_{in} 。(1) L_r 越大， D_{loss} 越大；(2) 负载电流 I_o 越大， D_{loss} 越大；(3) U_{in} 越低， D_{loss} 越大。

第 10 章 驱动电路

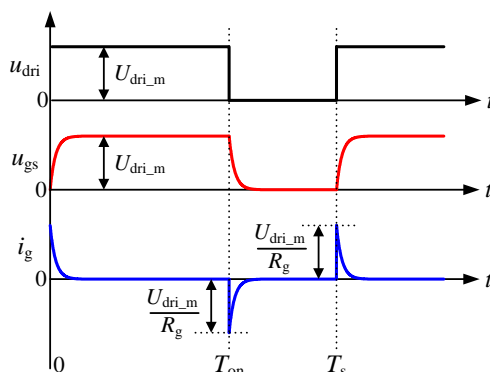
10-1 请画出 MOSFET 的典型驱动电路，并分析其驱动电压和电流波形。

答：

MOSFET 的典型驱动电路如图解 10-1 (a) 所示，其驱动电压电流波形如图解 10-1 (b) 所示。



(a) 电路图



(b) 主要波形

图解 10-1 MOSFET 的驱动电路图及其主要波形

10-2 请分析图 10.1(a)中所示的电阻 R_g 和 R_p 的作用。

答：

R_g 是栅极电阻，用来限制栅极初始充电电流和放电电流，也起到阻尼栅极电压 u_{gs} 振荡的作用；

因为 MOSFET 的输入电容是低泄漏电容，栅极不允许开路或悬浮。在栅源极之间并接 R_p ，起到电荷泄放作用，防止因静电感应使栅极电压 u_{gs} 上升到高于开启电压而造成误导通，甚至损坏器件。

10-3 MOSFET 的驱动电压能否为负？有什么优缺点。

答：

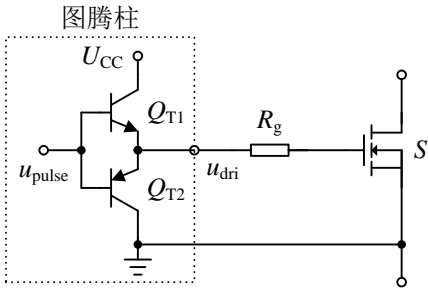
MOSFET 的驱动电压可以有负压。

加入负压后，可以防止开关管误导通，提高可靠性。但是产生负压需要额外的供电电源或者负压产生电路，增加了驱动电路的难度。同时，也会在一定程度上增加驱动损耗。

10-4 请绘制基于图腾柱的共地驱动电路。若想加快 MOSFET 的关断速度，有哪些方法？

答：

基于图腾柱的共地驱动电路如图解 10-2 所示。

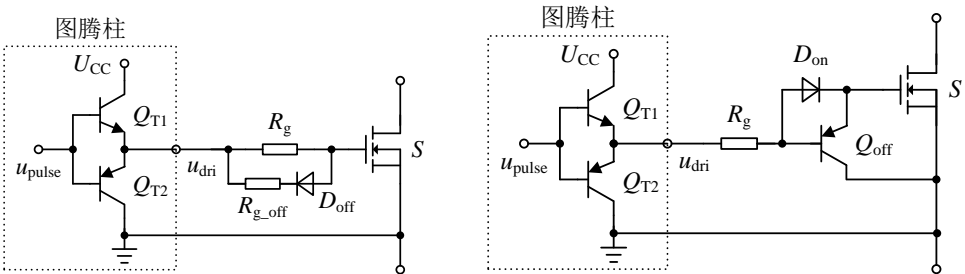


图解 10-2 基本的共地驱动电路

加速关断的方法有两种：

① 如图解 10-3(a)所示，在 R_g 上并联一个电阻 R_{g_off} 和二极管 D_{off} 。在放电时，两个电阻并联，有利于提高放电速度。

② 加入二极管 D_{on} 和 PNP 型晶体管 Q_{off} ，如图解 10-3(a)所示。当 u_{pulse} 为低电平时， Q_{T2} 导通， C_{iss} 上的电压使 Q_{off} 的基射极正偏，因而 Q_{off} 导通， C_{iss} 上的电荷直接通过 Q_{off} 释放到零，其放电速度更快。



(a) 在 R_g 上反并一个二极管 D_{off}

(b) 加入二极管 D_{on} 和 PNP 型晶体管 Q_{off}

图解 10-3 加速关断的图腾柱驱动电路

10-5 何为共地驱动、浮地驱动？请分别举例几种常见的电路拓扑。

答：

共地驱动是指控制电路与 MOSFET 的源极共地的，常见的拓扑有 Boost 电路、反激电路、桥式电路的桥臂下管等。

浮地驱动是指开关管的地与控制电路不是共地的，即开关管是浮地的，常见的拓扑有 Buck、Buck-Boost、Zeta、桥式电路的桥臂上管等。

10-6 请解释图 10.6 中的电容 C_B 和二极管 D_B 的作用。

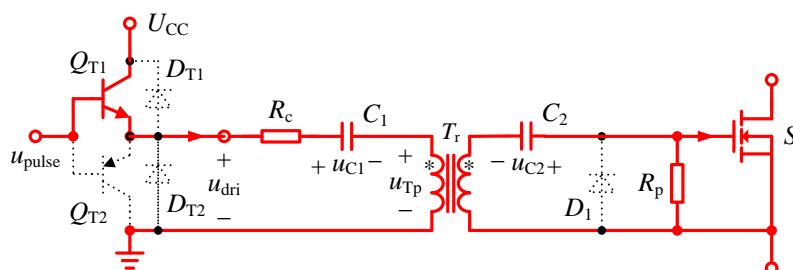
答：

C_B 为图腾柱的供电电容， D_B 为 C_B 提供充电通路。

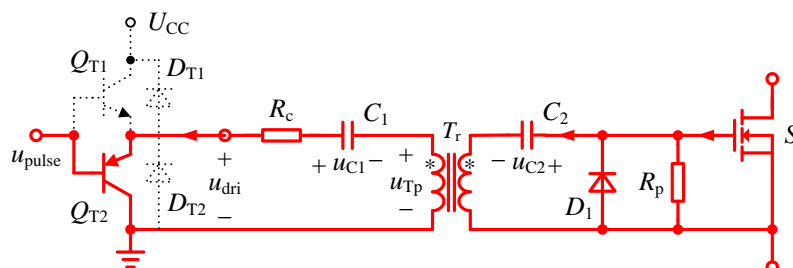
10-7 请结合图 10.9(a)，分析适用于单管变换器的隔离型驱动电路的工作原理。

答：

该驱动电路主要有两个工作模式，其等效电路如图解 10-4 所示。



(a) u_{pulse} 为高电平



(b) u_{pulse} 低电平

图解 10-4 单管用隔离型驱动电路不同工作模式的等效电路

当驱动信号 u_{pulse} 为高电平时， Q_{T1} 导通，如图解 10-4(a)所示。此时变压器原边电压 u_{Tp} 等于 $U_{cc} - U_{C1}$ ，那么稳态时加在开关管栅源极电压 u_{gs} 为 $U_{cc} - U_{C1} + U_{C2}$ 。

当驱动信号 u_{pulse} 为低电平时， Q_{T2} 导通，如图解 10-4(b)所示。此时变压器原边电

压 u_{Tp} 等于 $-U_{C1}$ ，那么二极管 D_1 导通。由此，电容 C_2 的电压 U_{C2} 等于 U_{C1} ，同时开关管输入电容放电到零，使 u_{gs} 等于零。

10-8 与 MOSFET 相比，IGBT 的驱动电路有哪些不同之处？

答：不同之处主要有以下几点：

- 1) 供电电压为正负电压。即当 IGBT 关断时，其栅射极电压为负电压，防止误导通；
- 2) 驱动信号采用光耦隔离后送入驱动电路，驱动逻辑是反的。
- 3) 增加了器件的过流保护电路。

第 11 章 电力电子电路中的磁性元件

11-1 请简述自感、互感和漏感的基本定义。

答：

① 自感：如果磁通全部匝链线圈匝数 N ，线圈中电流的变化会表现出一个电感系数 L ，即自感。

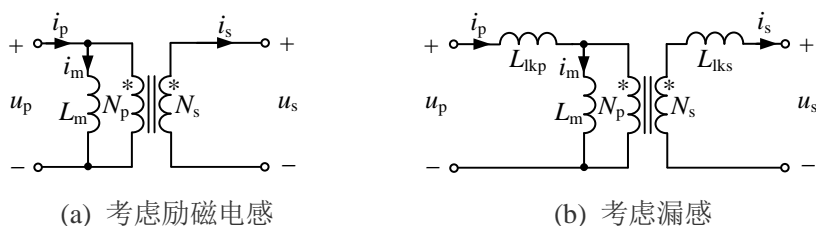
$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{N\Phi}{i}$$

② 互感：当一个线圈 N_1 中电流变化，它所产生的变化的磁通会在另一个线圈 N_2 中产生感应电动势的现象。

③ 漏感：当一个线圈 N_1 中电流变化，它所产生的部分变化磁通没有在另一个线圈 N_2 中匝链，称为漏磁通。漏磁通表征的电感即为漏感。

11-2 请画出两线圈变压器的等效电路模型（忽略寄生电阻、电容）。

答：



图解 11-1 实际变压器等效电路模型