

目 录

1. CCM 模式开关损耗.....	1
1.1 导通时的开关损耗.....	1
1.1.1 CCM 下反激式开关电源损耗公式.....	2
1.2 关断时的开关损耗.....	3
1.3 DCM 模式的开关损耗.....	5
2. 参考资料.....	6

1. CCM 模式开关损耗

CCM 模式与 DCM 模式的开关损耗有所不同。先讲解复杂 CCM 模式，DCM 模式很简单了。

1.1 导通时的开关损耗

CCM 模式下，开关的导通时的电流与电压波形如图 1 所示。

黑色的线: V_{ds}

红色的线: I_d

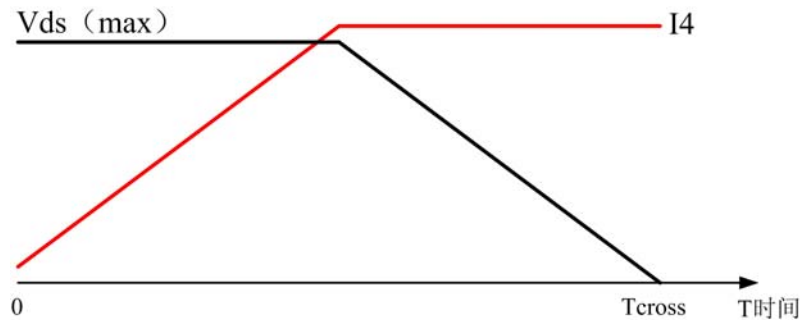


图 1 电压和电流波形

根据数据给出的原理：当 MOS 管接感性负载时，当电流变化时，电压保持不变；当电压变化时，电流保持不变。所以可以利用电流的平均值、电压的平均值来计算 MOS 管的导通时的开关损耗平均值，可得开关导通时的开关损耗为：

$$E = \left(\frac{I_4}{2} \times V_{ds(max)} \times \frac{T_{cross}}{2} \right) + \left(\frac{V_{ds(max)}}{2} \times I_4 \times \frac{T_{cross}}{2} \right)$$

$$= 0.5 \bullet V_{ds(max)} \bullet I_4 \bullet T_{cross}$$

使用积分计算方法的如下：

$$E_1 = \int_0^{T_{cross}/2} V_{ds(max)} \bullet I \bullet \Delta t$$

$$I = Kt \Rightarrow K = \frac{2I_4}{T_{cross}}$$

⇓

$$E_1 = V_{ds(max)} \bullet \frac{2I_4}{T_{cross}} \bullet \int_0^{T_{cross}/2} t \bullet \Delta t$$

⇓

$$E_1 = V_{ds(max)} \bullet \frac{2I_4}{T_{cross}} \bullet \frac{1}{2} \bullet \left(\frac{T_{cross}}{2} \right)^2$$

⇓

$$E_1 = \frac{1}{4} \bullet V_{ds(max)} \bullet I_4 \bullet T_{cross}$$

1.1.1 CCM 下反激式开关电源损耗公式

1. I4 电流的确定

先让我们回顾一下 CCM 模式下输入电感的电流波形，如图 2 所示。

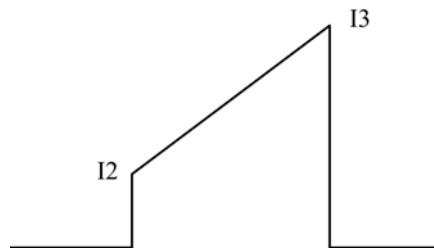


图 2 CCM 模式电流波形

由图 2 可知：I2 为 MOS 管导通时的电流，I3 为 MOS 管的最大电流。众所周知，反激式开关电源导通的转换时间是纳秒级的，而导通时间是微秒级的，所以导通时的开关损耗公式中的 I4=I2。

2. Vds 电压的确定

反激电路框图如图 3 所示。

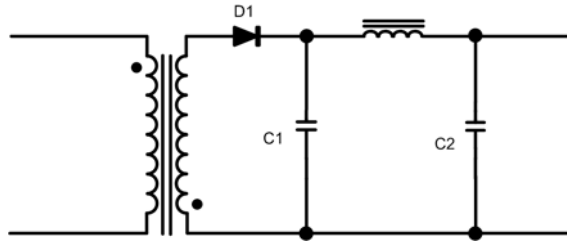


图 3 反激框图

在确定 V_{ds} 电压之前，需要确定几点原则：（1）变压器中有能量时，输入绕组、输出绕组至少有一个有电流流过或者两个都有（电流是变压器有能量的表现）；（2）输出二极管导通是需要电压的，也就是输出绕组的电压必须上升到 $V_o + V_f$ ；（3）电感电流不能突变。

由于电感电流不能突变，输出绕组必须维持 $D1$ 导通的电压来使电流迅速下降，然后才是输出绕组电压方向。所以导通转换过程中 $V_{ds} = V_{in} + V_{or}$ 。CCM 模式下，反激电源中 MOS 管导通时的开关损耗公式为：

$$E = 0.5 \cdot V_{ds(max)} \cdot I_4 \cdot T_{cross}$$

$$= 0.5 \cdot (V_{in} + V_{or}) \cdot I_2 \cdot T_{cross}$$

V_{or} 为初级绕组上的反射电压。

再次申明：CCM 模式下的反激式电源，MOS 管导通时的开关损耗计算公式中电压为 $(V_{in} + V_{or})$ ，而电流为最小电流 I_2 。

1.2 关断时的开关损耗

关断转换过程中的电压电流波形如图 4 所示。

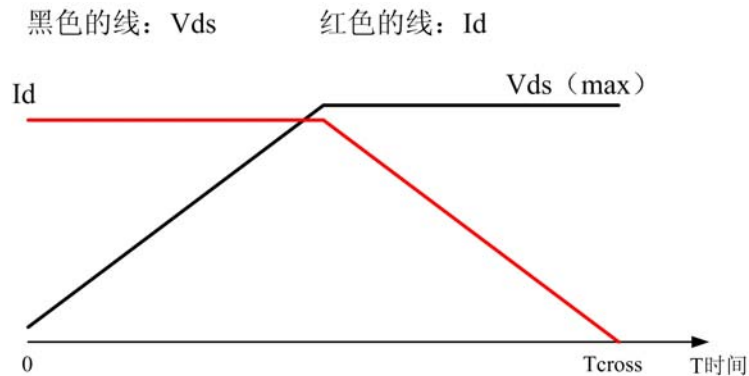


图 4 关断过程电压电流波形

根据数据给出的原理：当 MOS 管接感性负载时，当电流变化时，电压保持不变；当电压变化时，电流保持不变。所以可以利用电流的平均值、电压的平均值来计算 MOS 管的关断时的开关损耗平均值，可得开关关断时的开关损耗为：

$$E = \left(\frac{V_{ds(max)}}{2} \times I_d \times \frac{T_{cross}}{2} \right) + \left(\frac{I_d}{2} \times V_{ds(max)} \times \frac{T_{cross}}{2} \right)$$

$$= 0.5 \cdot V_{ds(max)} \cdot I_d \cdot T_{cross}$$

与前面计算开关导通时的开关损耗非常相识，看确有本质的不同。

1. 电流

在正常的反激式开关电源设计中，开关电源导通的转换时间是纳秒级的，而导通时间是微秒级的，所以导通时的开关损耗公式中的 $I_d=I_3$ （电流 I_3 如图 2 所示）。

2. 电压 V_{ds}

先上一个反激式漏极尖峰电压吸收电路，如图 5 所示，其中的红色部分。

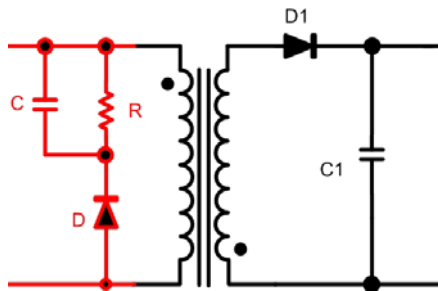


图 5 反激式漏极吸收电路

在确定 V_{ds} 电压之前，需要确定几点原则：（1）变压器中有能量时，输入绕组、输出绕组至少有一个有电流流过或者两个都有（电流是变压器有能量的表现）；（2）输出二极管导通是需要电压的，也就是输出绕组的电压必须上升到 V_o+V_f ；（3）电感电流不能突变。

有上面的三原则可知，输出绕组的电压先上升至 V_o ，然后输出整流管 $D1$ 导通，这个时候初级的电感电流急剧下降，输出绕组电流相应上升。而初级漏感尖峰电压上升速度比纳秒级还小，所以可以得出：开关关断过程损耗计算公式中电压应该为输入电压、电容 C 两端电压之和。

$$E = 0.5 \cdot (V_{in} + V_C) \cdot I_3 \cdot T_{cross}$$

V_C 为电压尖峰电路中电容的吸收电压，其中不仅包含反射电压，还有漏感导致的尖峰电压。 I_3 是输入电感上面的峰值电流。

2. DCM 模式的开关损耗

DCM 模式是几乎没有导通转换的交越阶段损耗，因为这个时候的输入电流几乎是为零的。但是还是有关断交越阶段的损耗，这个与前面的 CCM 模式下的一样。

本文不作总结了，也不会把反激的开关损耗公式列出来。因为结果和公式并不是最重要的，关键在于理解和公式是怎么出来的。

3. 参考资料

《精通开关电源设计》图灵

《实用开关电源设计》图灵