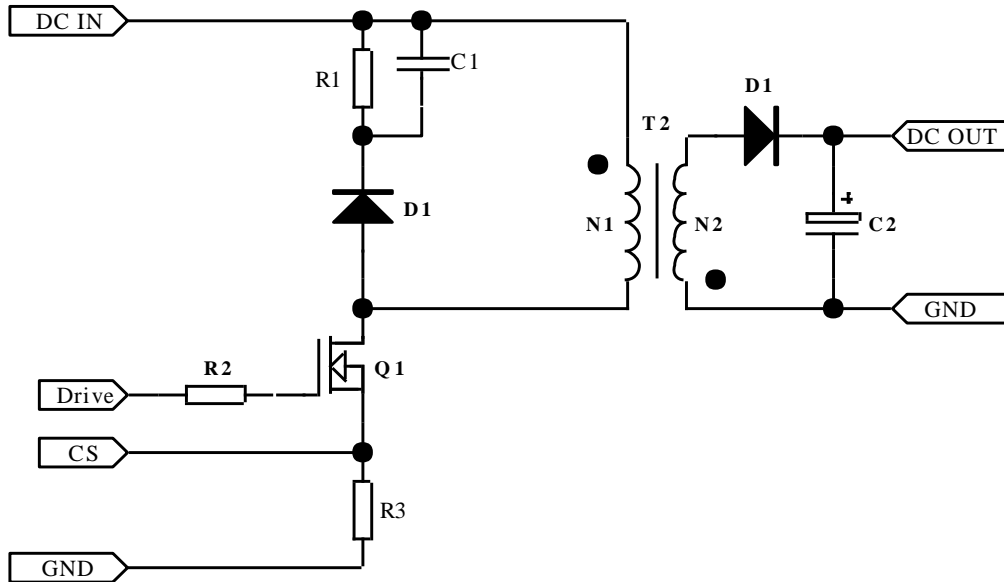


反激电路波形分析

1. 单管反激电路基本结构



基本工作原理 ON/OFF (省略)

2. 两种模式 DCM 和 CCM

(1) CCM 和 DCM 模式判断依据

CCM 和 DCM 的判断，不是按照初级电流是否连续来判断的。而是根据初、次级的电流合成来判断的。只要初、次级电流不同时为零，就是 CCM 模式。而如果存在初、次级电流同时为零的状态，就是 DCM 模式。介于二者之间的就是 BCM 模式。

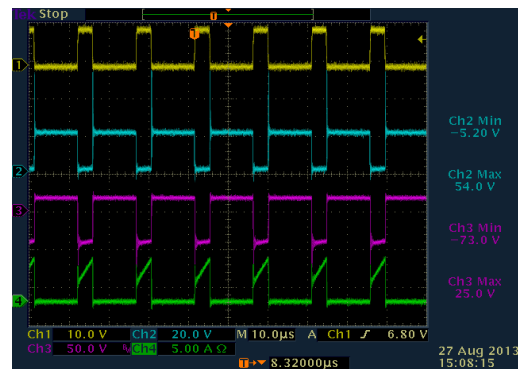
(2) 两种模式在波形上的区别

- 变压器初级电流，CCM 模式是梯形波，而 DCM 模式是三角波。
- 次级整流管电流波形，CCM 模式是梯形波，DCM 模式是三角波。
- MOS 的 V_{ds} 波形，CCM 模式，在下一个周期开通前， V_{ds} 一直维持在 $V_{in}+V_f$ 的平台上。而 DCM 模式，在下一个周期开通前， V_{ds} 会从 $V_{in}+V_f$ 这个平台降下来发生阻尼振荡。（ V_f 次级反射到原边

电压)。因此我们就可以很容易从波形上看出来反激电源是工作在 CCM 还是 DCM 状态



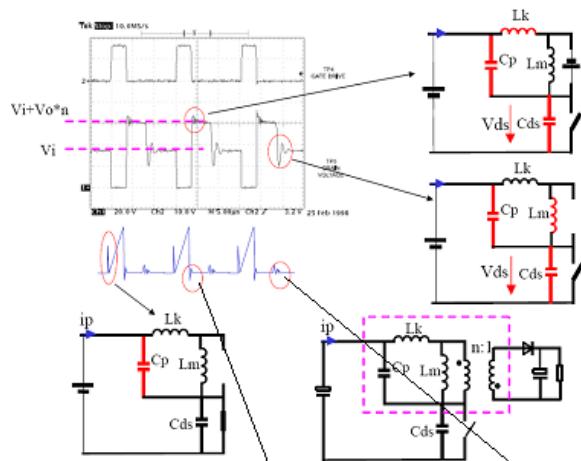
DCM



CCM

3. MOSFET 在开通和关断瞬间寄生参数对波形的影响

(1) DCM (Vds, Ip)



漏感和等效电容的谐振电流，由于漏感一般比较小，谐振回路阻抗相对较小，所有在波形上一般能够看见

励磁电感+漏感和等效电容的谐振电流，由于励磁电感一般比较大，谐振回路阻抗相对也大，故谐振电流非常小，所有在波形上一般都看不见

$$f_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi L_{lk} C_{lump}}}$$

$$f_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi L_m C_{lump}}}$$

$$C_{lump} = C_{oss} + C_p$$

在 MOS 关断的时候，Vds 的波形显示，MOS 上的电压远超过 Vin+Vf! 这是因为，变压器的初级有漏感。漏感的能量是不会通过磁芯耦合到次级的。那么 MOS 关断过程中，漏感电流也是不能突变的。漏感的电流变化也会产生感应电动势，这个感应电动势因为无法被次级耦合而箝位，电压会冲的很高。那么为了避免

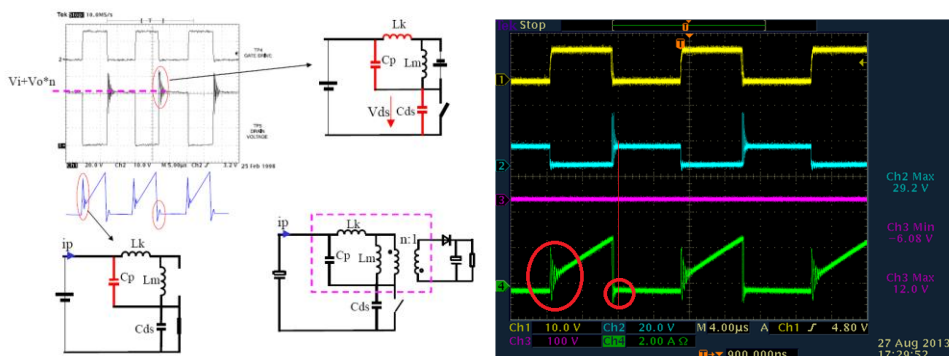
MOS 被电压击穿而损坏，所以我们在初级侧加了一个 RCD 吸收缓冲电路，把漏感能量先储存在电容里，然后通过 R 消耗掉

当次级电感电流降到了零。这意味着磁芯中的能量已经完全释放了。那么因为二极管电流降到了零，二极管也就自动截止了，次级相当于开路状态，输出电压不再反射回初级了。由于此时 MOS 的 V_{ds} 电压高于输入电压，所以在电压差的作用下，MOS 的结电容和初级电感发生谐振。谐振电流给 MOS 的结电容放电。 V_{ds} 电压开始下降，经过 $1/4$ 一个谐振周期后又开始上升。由于 RCD 箝位电路以及其它寄生电阻的存在，这个振荡是个阻尼振荡，幅度越来越小。

f_1 比 f_2 大很多（从波形上可以看出），这是由于漏感一般相对较小；同时由于 f_1 所在回路阻抗比较小，谐振电流较大，所以能够很快消耗在等效电阻上，这也就是为什么 f_1 所在回路很快就谐振结束的原因！（具体谐振时间可以通过等效模型求解二次微分方程估算）



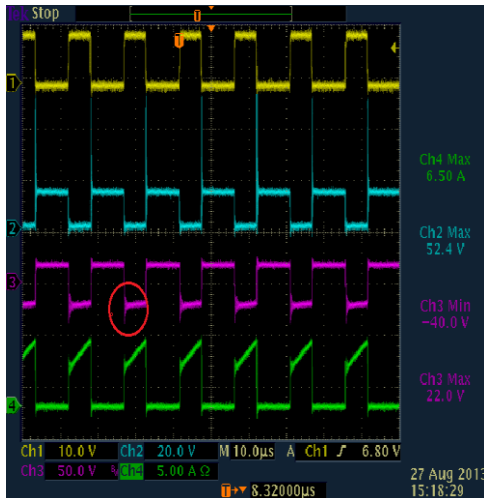
(2) CCM (V_{ds} , I_p)



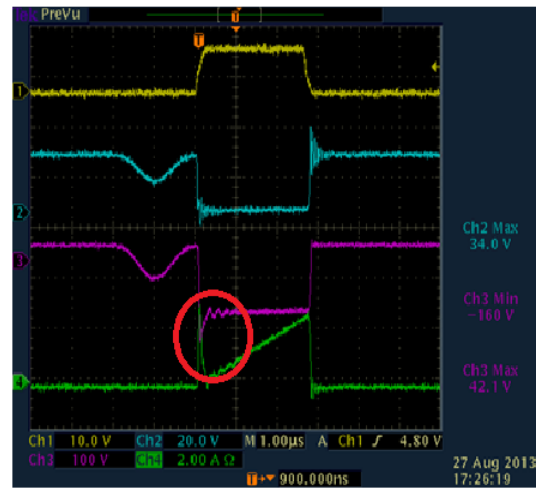
$$f = \frac{1}{\sqrt{2\pi L_k C_{lump}}}$$

$$C_{lump} = C_{oss} + C_p$$

(3) 其他一些波形分析 (次级输出电压 V_s , I_s , V_{ds})



CCM (ch3 为变压器副边 V_s 波形)



DCM (ch3 为变压器副边 V_s 波形)

不管是在 CCM 模式还是 DCM 模式, 在 mosfet 开通 on 时刻, 变压器副边都有震荡。主要原因是初次级之间的漏感+输出肖特基(或快恢复)结电容+输出电容谐振引起, 在 CCM 模式下与肖特基的反向恢复电流也有一些关系。故一般在输出肖特基上并联一个 RC 来吸收, 使肖特基应力减小。

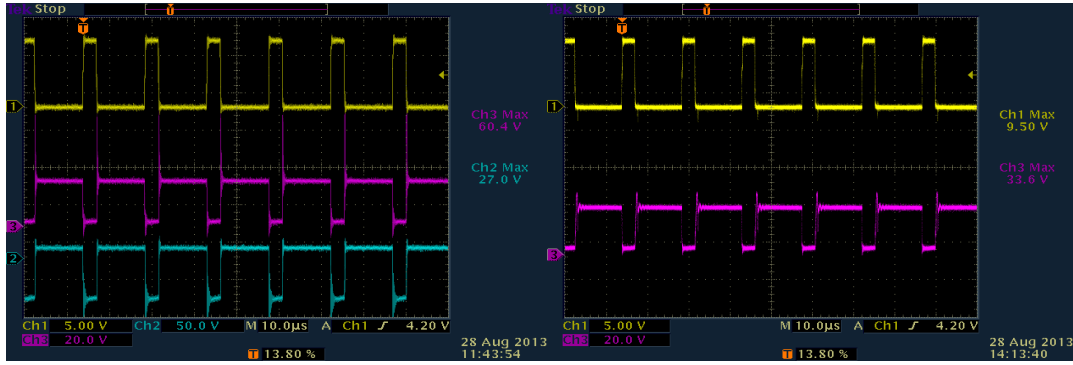


CCM (ch3 为变压器副边 I_s 波形) DCM (ch3 为变压器副边 I_s 波形)



不管是在 CCM 模式还是 DCM 模式, 在 mosfet 关断 off 时刻, 变压器副边电流 I_s 波形都有一些震荡。主要原因是次级电感+肖特基结电容+输出电容之间的谐振造成的

(4) RCD 吸收电路对 V_{ds} 的影响

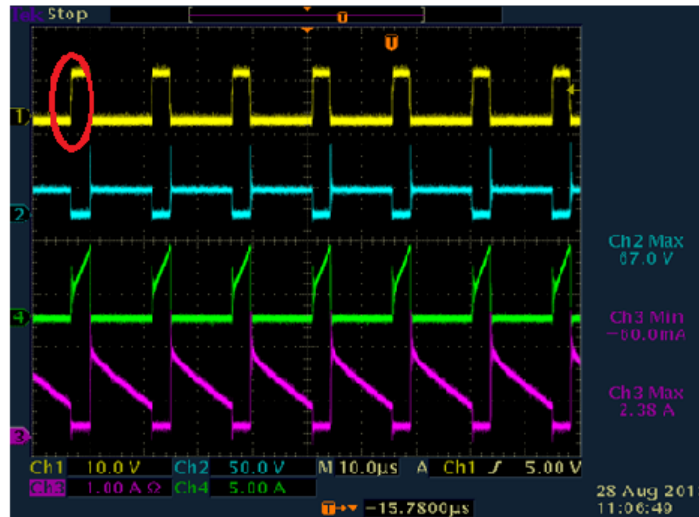


Ch3=Vds (加吸收前)

Ch3=Vds (加吸收后)

在 MOS 关断的时候，Vds 的波形显示，MOS 上的电压远超过 $V_{in}+V_f$ ！这是因为，变压器的初级有漏感。漏感的能量是不会通过磁芯耦合到次级的。那么 MOS 关断过程中，漏感电流也是不能突变的。漏感的电流变化也会产生感应电动势，这个感应电动势因为无法被次级耦合而箝位，电压会冲的很高。那么为了避免 MOS 被电压击穿而损坏，所以我们在初级侧加了一个 RCD 吸收缓冲电路，把漏感能量先储存在电容里，然后通过 R 消耗掉

(5) Vgs 波形



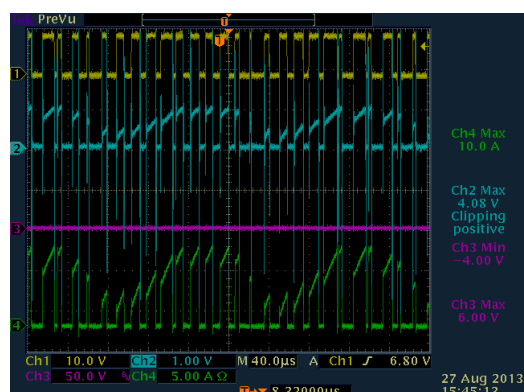
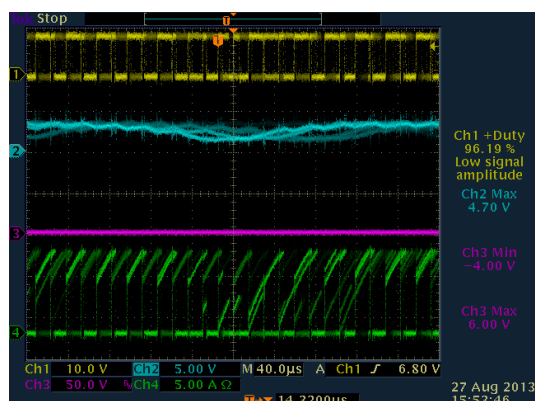
为使 mosfet 在开通时间的上升沿比较陡，进而提高效率。在布线时驱动信号尽量通过双线接到 mosfet 的 G、S 端，同时连接尽量短些。

4. 设计时需注意点

(1) 尽量使反激电路最大工作占空比小于 50%，若要使占空比工作在大于 50%，为避免次谐波震荡，需加上斜率补偿，此外还需注意变压器能否磁复位。由于 mosfet 导通和关断需要一定的时间，同一批次的变压器单体之间也有差异，建议反激最大工作占空比小于 45%。

(2) 反激的功率地和控制地的连接须注意单点接地，特别是在哪个地方进行单点接地需慎重。为有效地吸收地噪声（mosfet 的开通和关断），输入电容的一个脚尽量靠近共地点。

(3) 由于电压外环的 PID 输出与电流内环进行比较来决定占空比，事实上 PID 的输出不是一条绝对直线，它是在直流的基础上叠加了一个低频分量，为保证输出稳定，在设计时需使内环带宽比外环带宽大于 10 倍以上。



Ch2=电压外环 PID 输出

上述波形一般在开始调环路或者在输入 V_{IN} 比较高时经常会出现，主要原因是外环的带宽太快了，为使系统稳定，需减小带宽，一般可通过减小比例 P 或者增大积分 C 来解决。