

电源设计的同步整流技术

杨欣

2013/07/06

议程

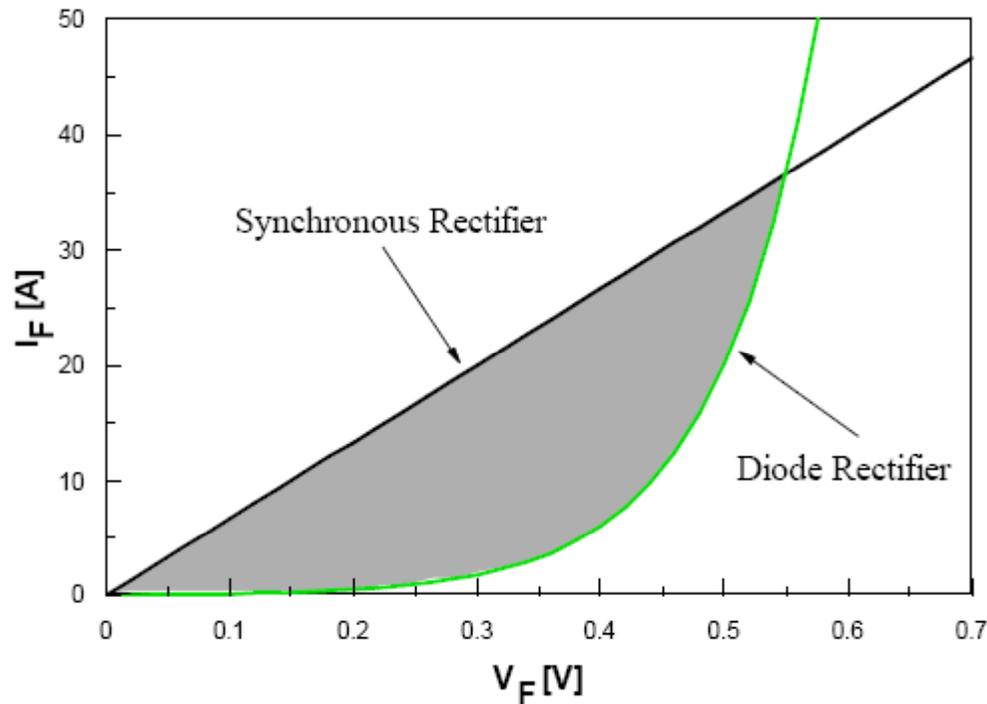
1. 同步整流的基本概念。
2. 同步整流实现的基本原则
 - 2.1 如何从二极管拓扑转化为同步整流拓扑
 - 2.2 同步整流的适用场合
3. 同步整流的类别。
 - 4.1 外驱动同步整流
 - 4.2 电压型自驱动
 - 4.3 电流型自驱动
4. 常见拓扑同步整流的基本实现方法
 - 3.1 Buck同步整流的实现方法。
 - 3.2 Forward同步整流实现方法。
 - 3.3 Fly-back同步整流实现方法
 - 3.4 桥式拓扑同步整流实现方法
5. 同步整流损耗分析及其它。
 - 5.1 同步整流损耗分布。
 - 5.2 同步整流的控制时序。
 - 5.3 应用同步整流提升动态响应。

同步整流基本概念

- 新的电源尺寸的需求，功耗的不断降低，要求供电电压也越来越低。
- 开关电源的损耗主要由3部分组成：功率开关管的损耗，高频变压器的损耗，输出端整流管的损耗。在大电流输出场合二极管损耗占据主导，可大到50%到60%。
- 用通态损耗低的功率MOS管—同步整流管代替整流二极管，可提高DC-DC变换器的效率。
- 为了这种电路能够正常运作，必须对同步整流器(SR)加以控制，这是基本的要求。同步整流器是用来取代二极管的，所以必须选择适当的方法，按照二极管的工作规律来驱动同步整流器。

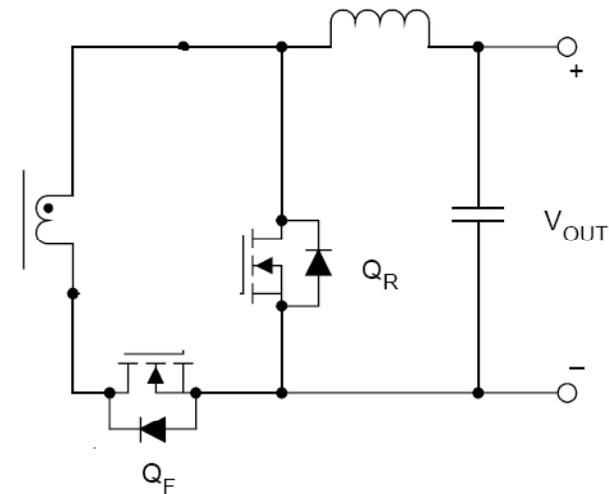
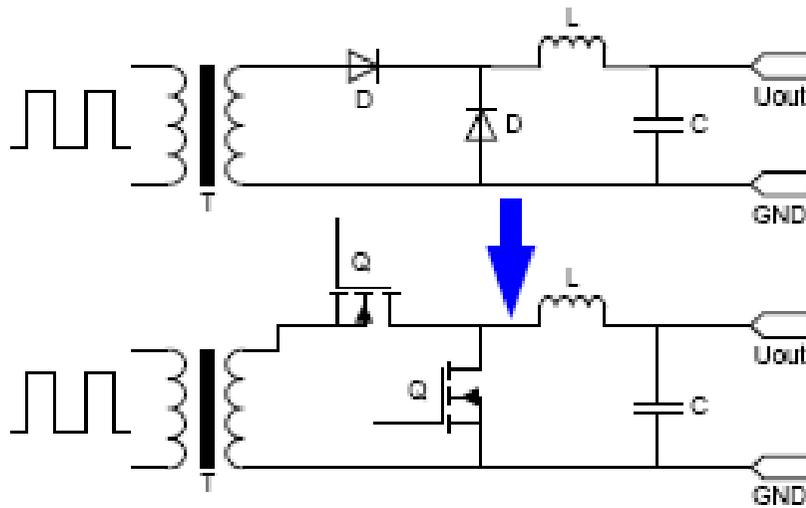
同步整流的基本概念-优势？

下图阐述了同步整流对于二极管整流的劣势所在，同步整流是线性的损耗，一定的 R_{ds_on} 情况下，在很大一个范围内，同步整流都有损耗低的优势。



同步整流的基本原则(二极管 to 同步整流)

1. 二极管改为同步整流拓扑要符合MOS体二极管方向和原拓扑相同。
2. 在改动时候应该注意到驱动容易程度, 如下图。容易的驱动方法应该讲整流管(forward)改为下面以便共地方便驱动。



同步整流的基本原则(适用场合)

- 常规来讲**低压大电流同步整流**非常适合, 如**1.2V,3.3V,5V**等, 效率可以得到明显的提升。
- 最新的产品设计表明, 即使在**12V,28V**,甚至**55V**输出电压下,如果功率较高 (**>50W**), 即使**MOS**体二极管反向恢复差于快速二极管, 在良好设计的情况下, 同步整流依然可以提升效率。
- 传统的同步整流方案基本上都是**PWM型同步整流**, 主开关与同步整流开关的驱动信号之间必须设置一定的死区时间, 以**避免交叉导通**,

同步整流的类别

同步整流从驱动方法上来说，分为外驱动同步整流，自驱动同步整流和半自驱动同步整流。

同步整流的自驱动同步整流又可分为电压型自驱动和电流型自驱动。

同步整流的类别-外驱动同步整流

外驱动同步整流技术的特点是驱动电压是来自外设驱动电路，同步信号是由主开关管的驱动信号来控制。

优点：

- 1.控制时序精确，从而使得SR效率较高。
- 2.开关机的驱动时序容易控制。

缺点：

- 1.驱动电路比较复杂，需要有自己的开发或者用特有的芯片来控制。
- 2.控制线路和驱动器的本身会带来额外损耗，低功率场合并不适用
- 3.价格贵，开发周期长

同步整流的类别-电压型自驱动同步整流

电压型自驱动同步整流的驱动电压一般来自于变压器同步整流管所在回路中的电压或者变压器其它辅助绕组，它需要要变压器波形转换快，时序准确，死区小。

优点：

- 1.价格优势，不需要昂贵器件。
- 2.线路相对简单。

缺点：

- 1.驱动方式和电路拓扑本身关系很大，设计并不容易。
2. 驱动电平和输入电压，输出电压影响比较大。
3. 受变压器漏感影响；
4. 开关机过程的控制较困难。

同步整流的类别-电流型自驱动同步整流

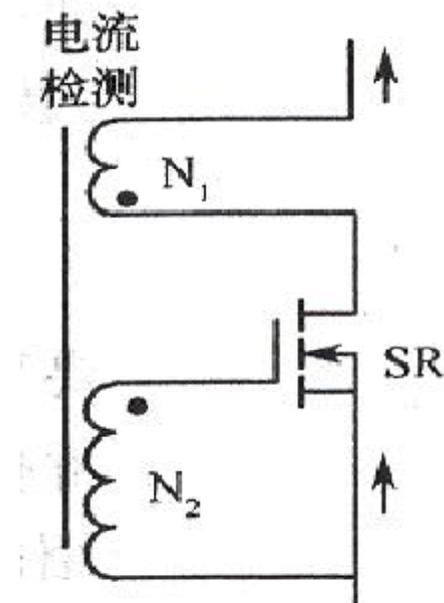
电流型自驱动同步整流的驱动电压是来自于SR中的电流通过电流互感器产生。

优点：

- 1.驱动波形无死区，不受输入电压和电路结构的影响。
- 2.适用于变压器波形并非正弦波的驱动，如谐振类拓扑LLC。

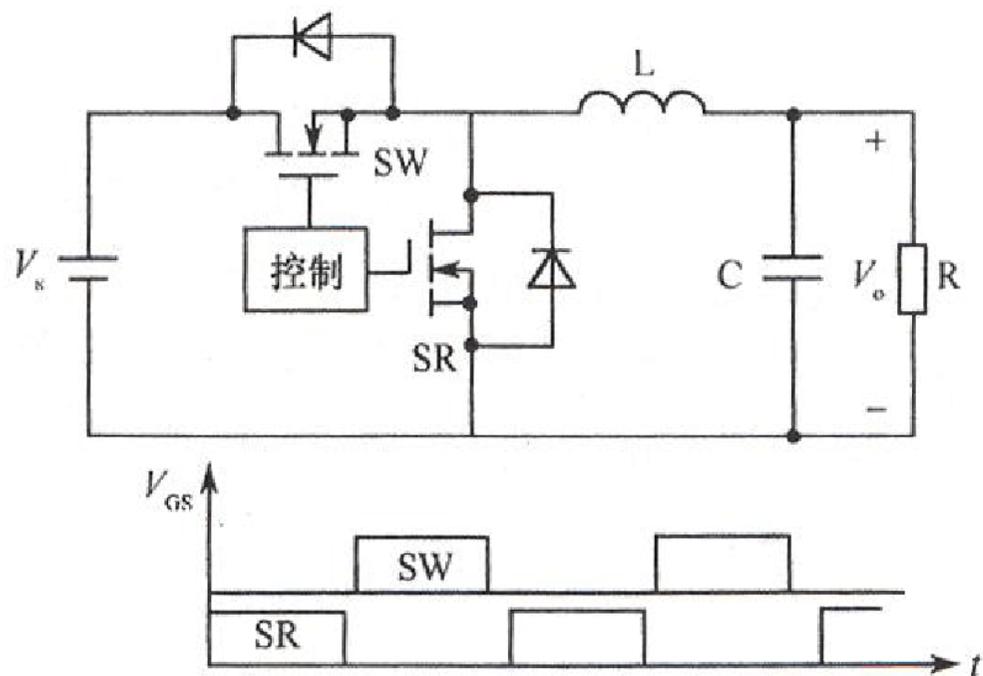
缺点：

1. 电流检测元件在副边大电流场合有损耗。
2. 电流检测元件通常较昂贵。



常见拓扑的同步整流方法-buck

Buck拓扑的常见同步整流时序是较常规的互补驱动，多数为外驱动型控制。



常见拓扑的同步整流方法-buck

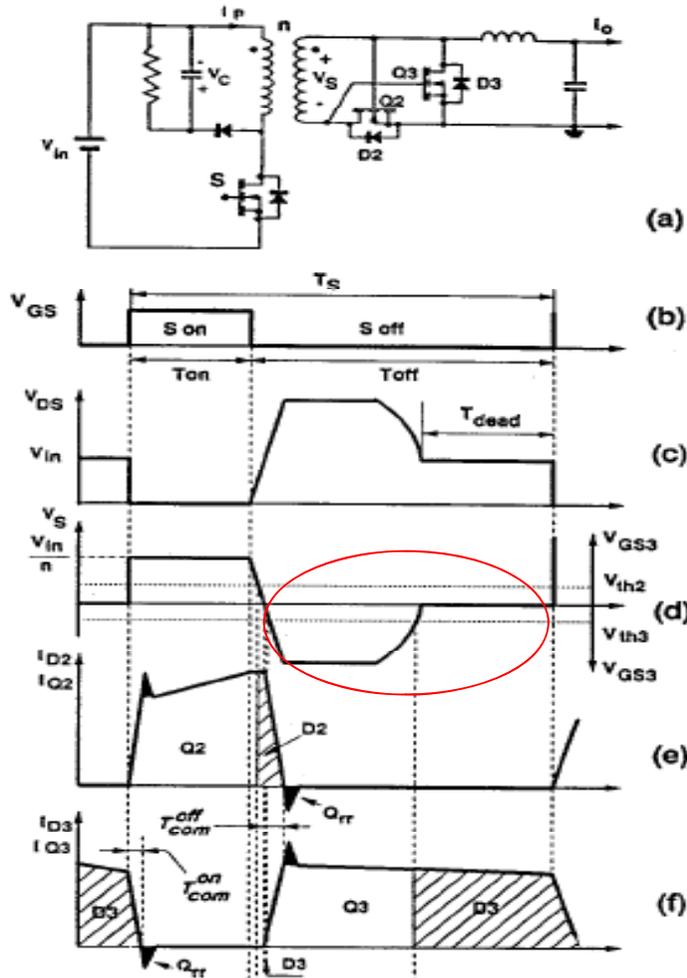
- 一般来说, **Buck**类拓扑同步整流最多应用与低压场合, 如输入**5V-12V**,输出**0.6V-3.3V**。
- **Buck**类低压同步整流值得注意的是由于占空比多为不大的情况, 上管选择多为**Qg**较小的**MOS**来降低开关损耗, 而下管由于续流时间较长且零电压开通, 多选择**Rds_on**较低的**MOS**降低导通损耗。
- 有多种控制**ic**可以来实现**buck**同步整流的控制, 如**TI,intersil**等, **TI**的**adaptive control**也有应用于**buck**类拓扑。

常见拓扑的同步整流方法-Forward

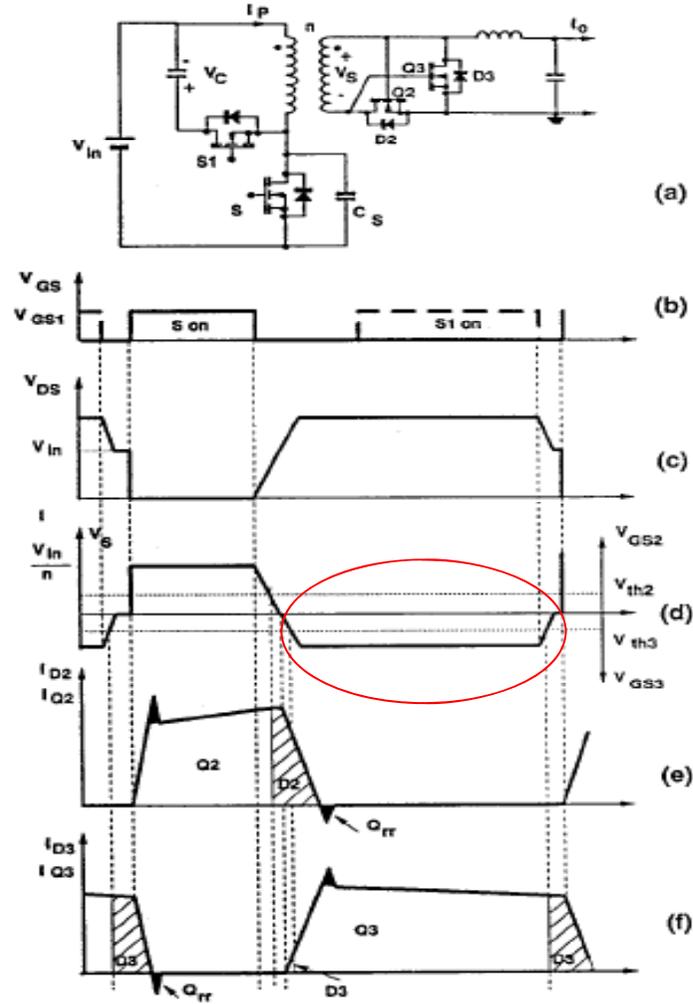
Forward拓扑的同步整流，尤其是自驱动同步整流相对多样化，原因在于如果Forward拓扑直接采用自驱动，不同的复位方式需要不同的自驱动方法。

1. 谐振复位，RCD复位，双管正激类的拓扑，由于变压器电压并不是互补的电压，不适合直接自驱动，多采用栅荷保持+提前关断的方法。
2. 有源钳位拓扑，变压器电压为互补的电压，多采用直接的自驱动方法，其中又分为直接自驱与第三绕组自驱动。

Forward-不同复位

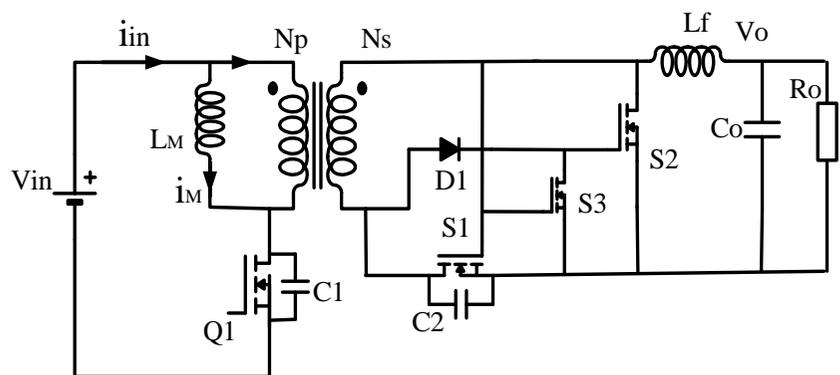


RCD复位

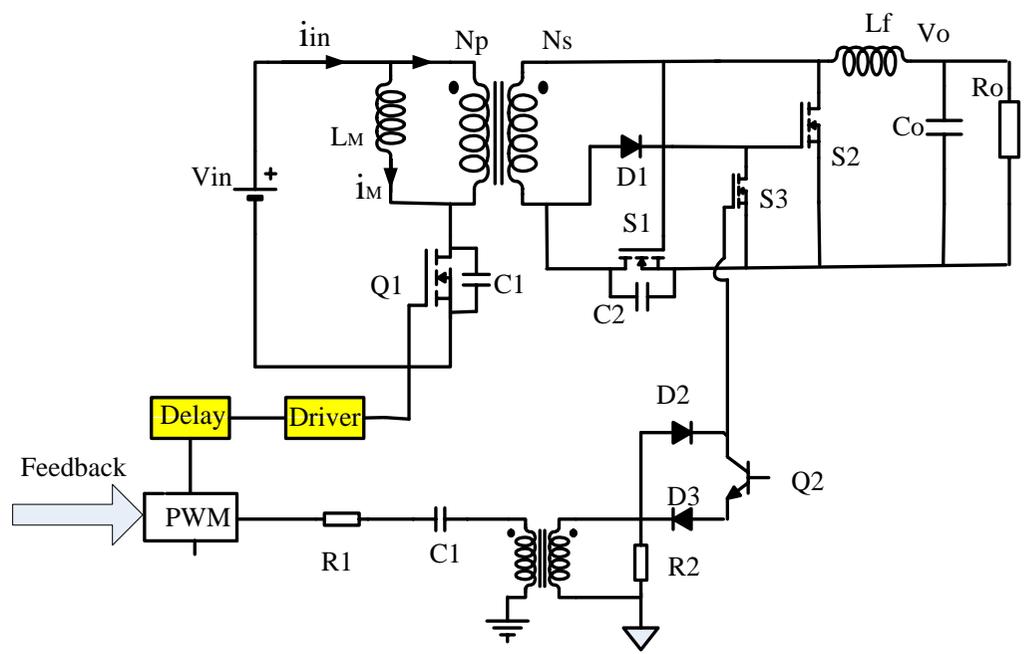


有源钳位

Forward-栅荷保持+提前关断

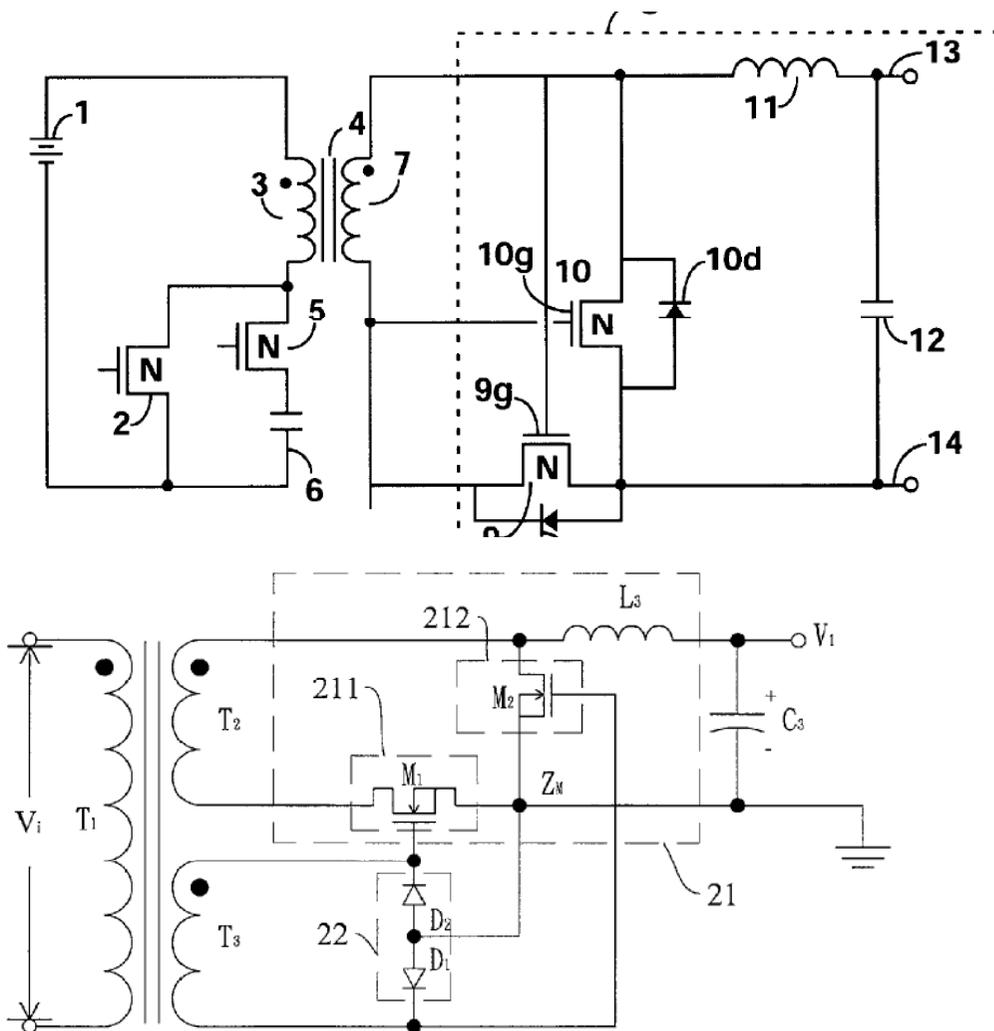


理想的栅荷保持法,
S1开通后才能关断
S2,Q1与续流管S2
存在共通



实际可行的方法,
消除了共通, 但信
号变压器增加了复
杂度

Forward—有源钳位自驱动



常规的直接自驱动，但有一定局限，适合于3.3V,5V, 12V及以上输出电压在合适的占空比下不能直接通过主绕组驱动。

第三绕组自驱动，适用于低压的2.5V等

Forward—其它

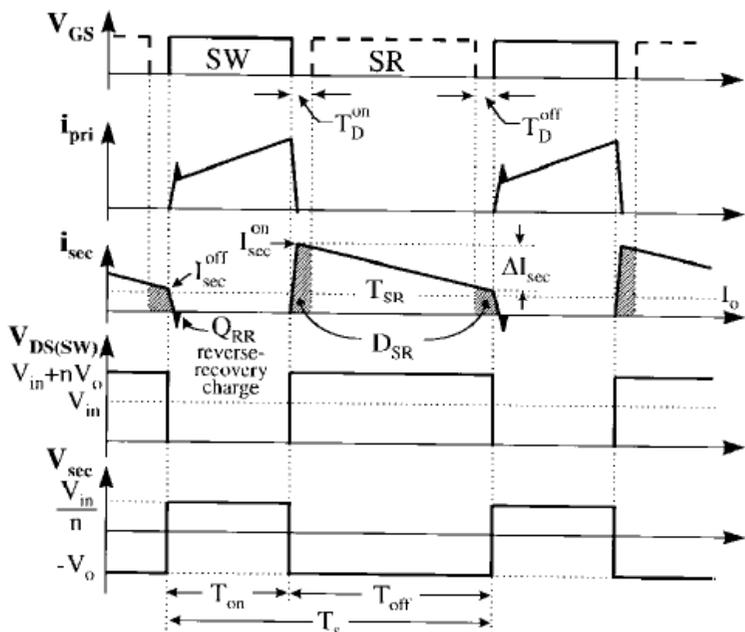
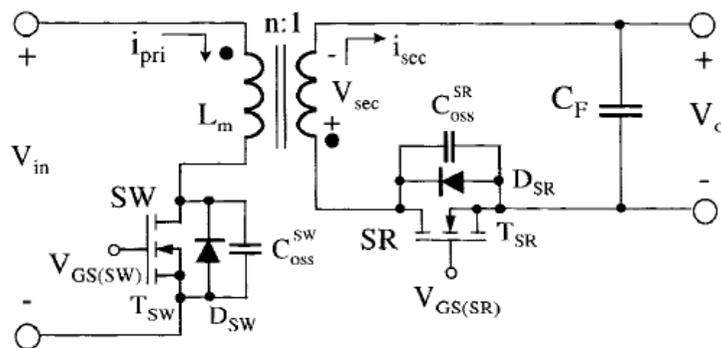
- 上述自驱动线路只是最基本的电路思路，**并不代表可直接使用。**
- 除了自驱动，传信号外驱动和变压器驱动也是可行的方案。
- **Forward拓扑的自驱动方式是多种多样的，有更多其它的方式并没有详细说明。**

常见拓扑的同步整流方法-Flyback

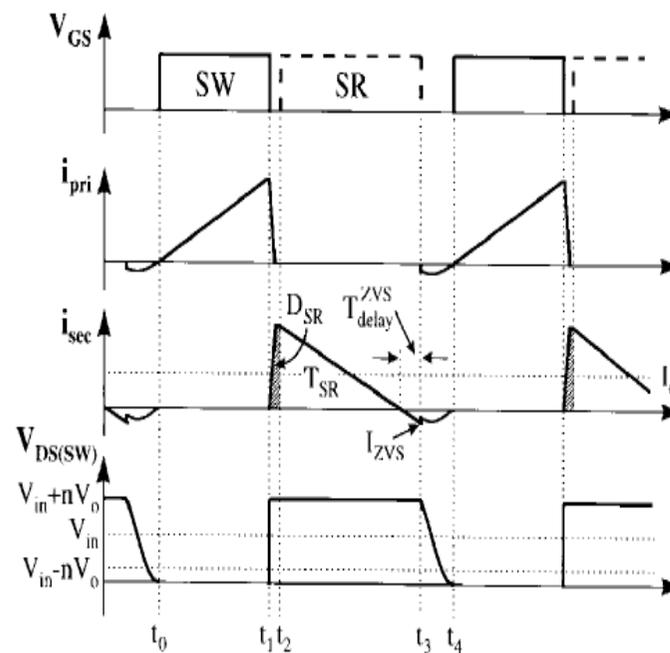
Flyback拓扑的同步整流也是和拓扑本身的控制方式相关很大, 主要分为CCM模式和DCM模式

1. CCM模式下, 空载和满载的占空比变化不大, 空载或者轻载下模块会有负电流, 但可以带来较好的满载效率, 适合低压的应用, 但Flyback CCM模式并不容易实现, 需要对副边同步整流管提前原边开通前关断。
2. DCM模式需要对副边电流过零点进行采样关断副边MOS, 会带来更好的轻载效率, 工作模式更像“二极管”, 在高压输入的电源中, QR模式非常适合做DCM的同步整流。

常见拓扑的同步整流方法-DCM or CCM

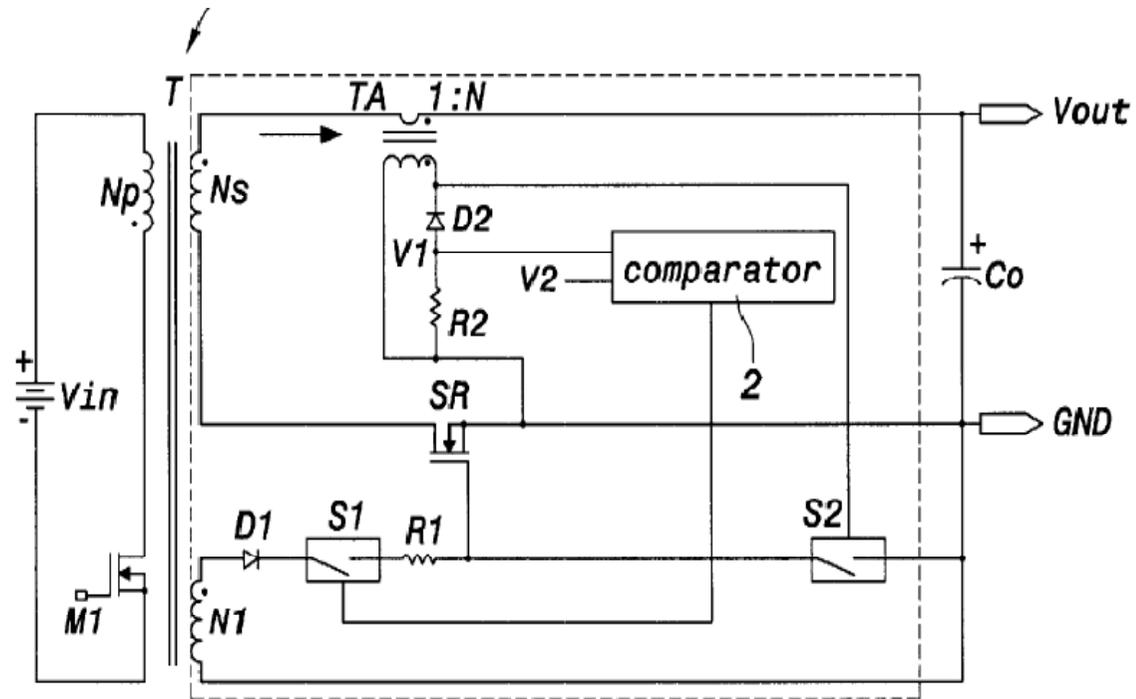


CCM 同步整流



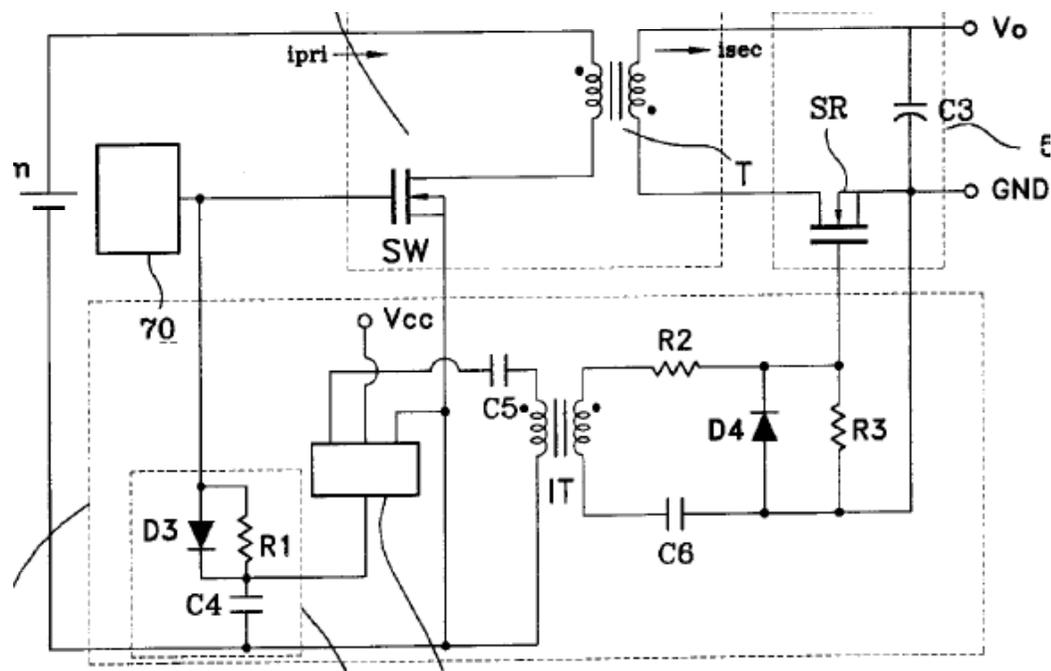
DCM 同步整流

Fly-back—自驱动1-DCM



- 优势:
- 轻载损耗低
- 无反流
- 劣势:
- 电流互感器比较昂贵
- 只能在DCM或者CRM模式运行良好, 常用于QR mode

Fly-back—驱动变压器-CCM



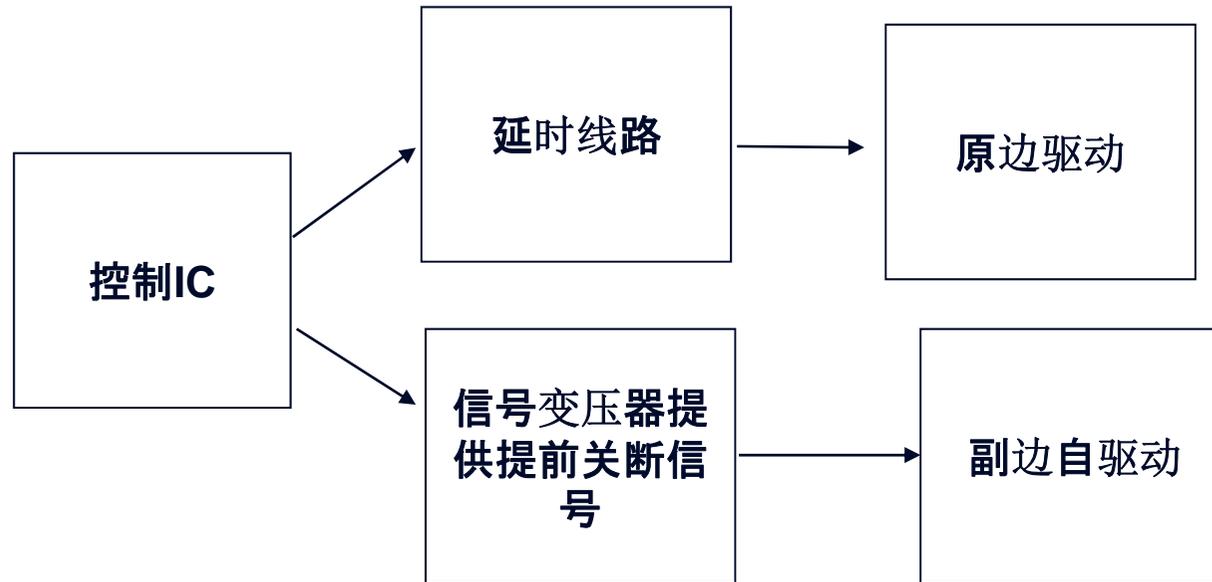
优势:

- 简单
- 可靠
- 无共通

劣势:

- 驱动变压器的绝缘能力有限
- 昂贵
- 更大的体积
- 关断控制不佳

Fly-back—自驱动-CCM



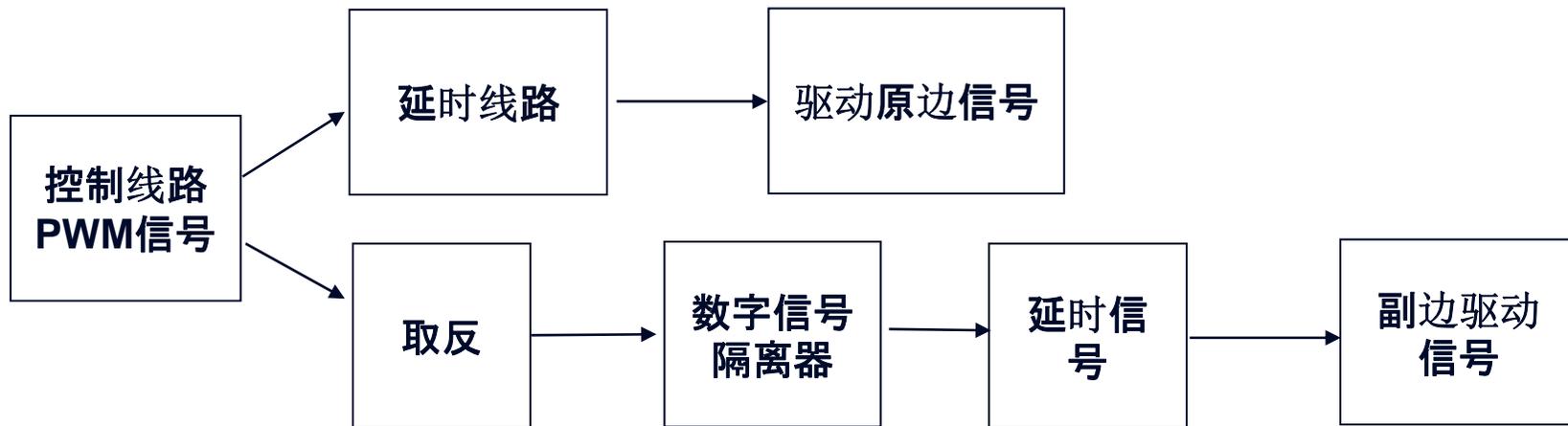
优势:

- 相对DCM效率较高

劣势:

- 关机控制相对困难

Fly-back—外驱动1-CCM



优势:

- 精确的死区控制, 适合高频应用
- 关机控制较好

劣势:

- 昂贵
- 器件数目多

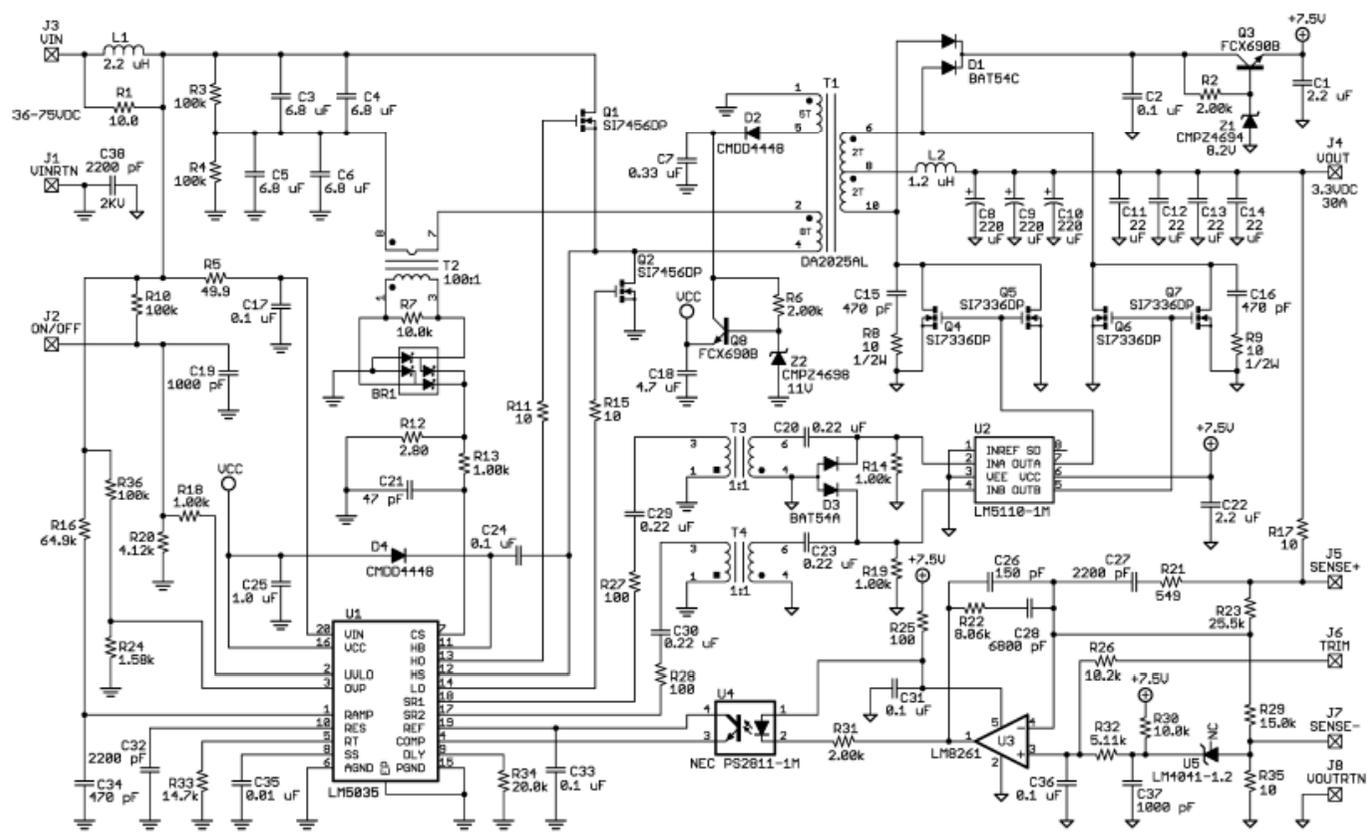
常见拓扑的同步整流方法-Fullbridge

桥类拓扑的同步整流驱动方法最多应用为外驱动的方法，常用信号变压器+驱动器或者数字隔离器+驱动器的方法来实现。

1. 桥式同步整流的一般原则是，变压器方向变换前，需要关断副边的一组同步整流管以免产生共通。

2. 半桥类，current doubler和一般的全桥在副边同步整流控制上并没有区别。

常见拓扑的同步整流方法-Full bridge



这是常用的全桥控制芯片LM5035的应用图纸，这里应用了信号变压器+driver的方式来驱动副边同步整流管。

常见拓扑的同步整流方法-Full bridge

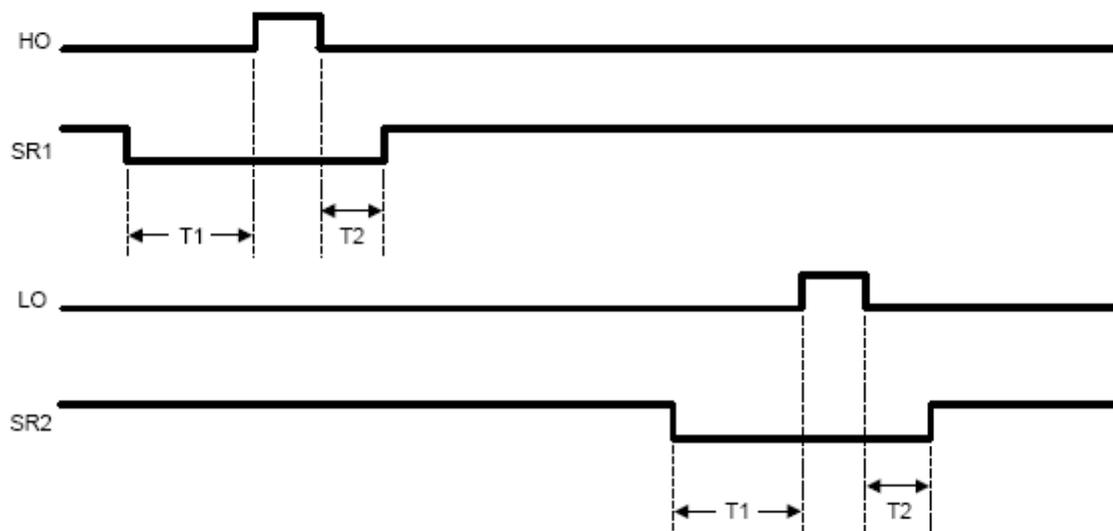


Figure 15. HO, LO, SR1 and SR2 Timing Diagram

Ho, Lo是常用的桥式拓扑的A,B两组PWM信号，注意到副边的SR1和SR2一定在原边开关管开通前关断，T1的死区一定要足够，而T2死区后开通SR，变压器处于零阶段，SR1和SR2同时续流。

同步整流的损耗

同步整流管的损耗计算一般也是包括以下几方面：

- 导通损耗
- 开关损耗
- 驱动损耗
- 反向恢复损耗
- 死区时间二极管损耗

同步整流的损耗—Rds_on vs Qg

导通损耗一般由功率拓扑和选用MOS的Rdson决定, 值得指出的是, 导通损耗, 开关损耗和驱动损耗Pgate存在一定的权衡关系, 由于MOS的Qg和Rdson成反比, 而Qg大小一定程度上又与开关损耗成反比。所以, 需要选择合适而不是最小Rdson的MOS。

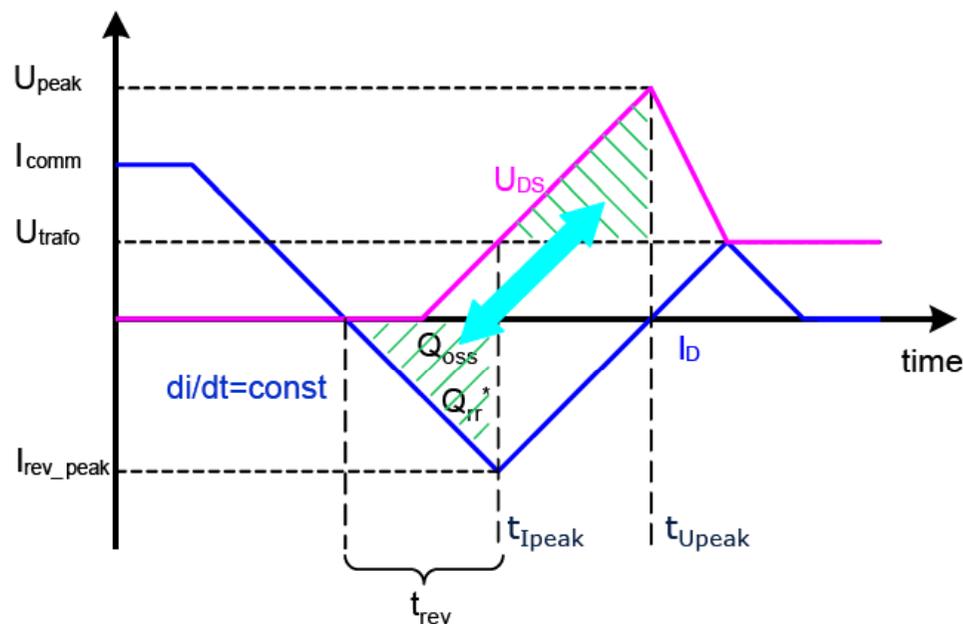
另外, 值得指出的是在一些自驱动线路中, 驱动电平Ug在高压较高会带来额外的损耗也需要考虑其中。

$$P_{cond} = I_{RMS}^2 \cdot R_{DS(on)}$$

$$P_{gate} = Q_g \cdot U_g \cdot f_{sw}$$

同步整流的关断损耗

关于开关损耗，值得指出的是很多同步整流开通是零电压开通的，而关断损耗占据了主导。下图是关于关断损耗的一个图，分别包含了 Q_{oss} 损耗(容性损耗)，开关损耗和反向恢复损耗。



$$P_{sw} = U_T \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot Q_{oss} + Q_{rr}^* \right) \cdot f_{sw}$$

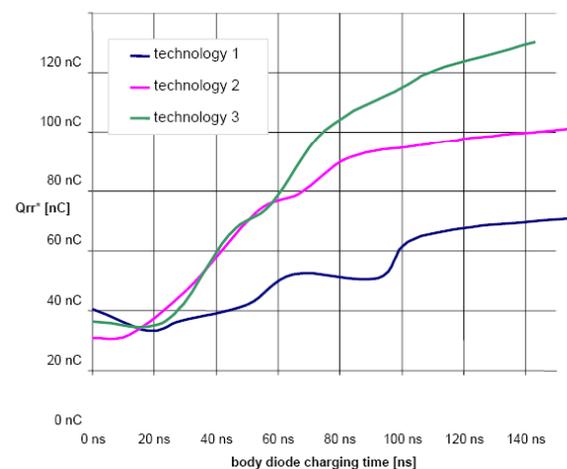
如何减少同步整流的反向恢复损耗

反向恢复损耗, 在高压MOS上, 占据非常大的比例, 消除反向恢复损耗的常见方法如下:

1) 尽量减小死区时间, 如下图所示, 二极管的反向时间决定了Qrr, 减小体二极管工作的时间, 这不光减小了反向恢复损耗, 也同时减小了二极管

管的死区导通损耗 $P_{diode} = U_D \cdot I_{SD} \cdot t_D \cdot f_{sw}$

2) 采用内部并联肖特基二极管的MOS.



同步整流的关机

同步整流驱动关机,经常会遇到的问题是关机波形不单调,有负电流折向原边,大多是以下原因:

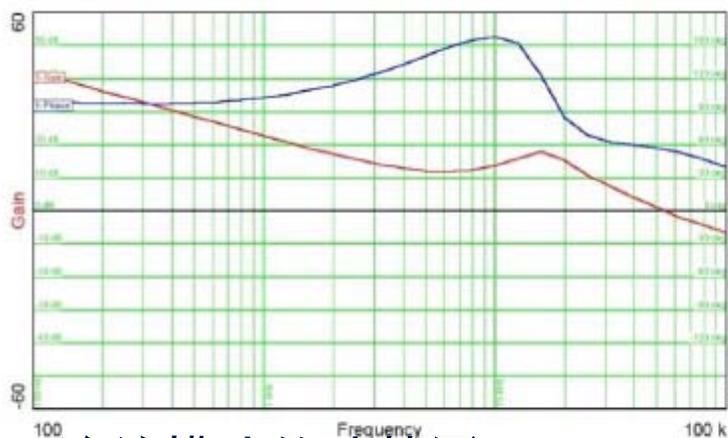
- 1) 自驱动同步整流关机时候在前一阶段为同步整流模式,电压掉到一定程度,变为二极管模式,从而带来不同的输出电压下降斜率。
- 2) 外驱动同步整流原边关机后,副边未正确的及时关断。

解决思路:

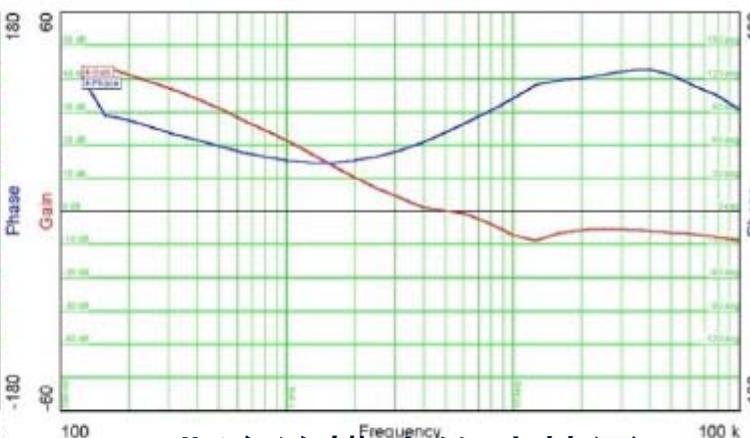
- 1) 采用一定的控制方法控制副边同步整流管在原边关断后快速关断,变为二极管模式关机。
- 2) 采用一定的方法控制副边同步整流软关断。

同步整流—更好的动态响应

值得指出的一点是，同步整流线路不仅仅能带来效率的提升，在提高电路的动态响应方面，如果采用CCM模式的同步整流，会带来动态响应的提升。二极管在低载情况下，环路特性会非常难以补偿从而带来较差的动态响应，而CCM的同步整流，在空满载情况下是接近的



连续模式的波特图



非连续模式的波特图

**Any Questions?
Thank you!**