

2012-07-25

Rev 05

## IGBT有源钳位技术的介绍

Winson Wei (魏炜)

CT-Concept Technologie AG - Switzerland

Wei.wei@igbt-driver.com

Mobile: 186-8878-5868

## IGBT有源钳位的意义

有源钳位电路的目标是钳住IGBT的集电极电位，使其不要到达太高的水平，如果关断时产生的电压尖峰太高，或者太陡，都会使IGBT受到威胁。

IGBT在正常情况关断时会产生一定的电压尖峰，但是数值不会太高，但在变流器过载或者桥臂短路时，如果要关断管子，产生的电压尖峰则非常高，此时IGBT非常容易被打坏。

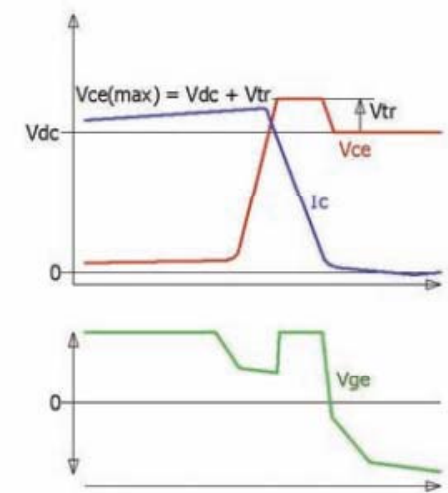
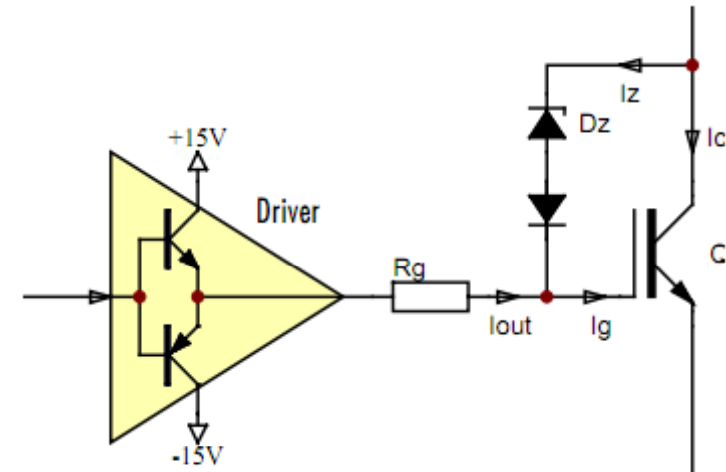
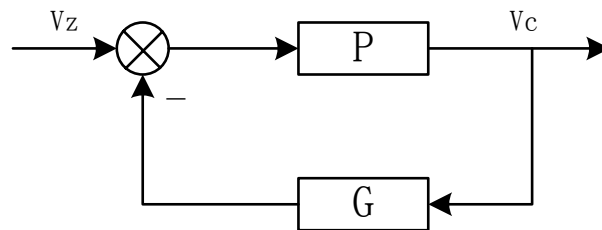
所以有源钳位电路通常在故障状态下才会动作，正常时不工作。

## 最基本的有源钳位电路

右图所示为最基本的有源钳位电路，只需要TVS管和普通快恢复二极管即可构成。

其原理是：当集电极电位过高时，TVS被击穿，有电流流入门极，门极电位得以抬升，从而使关断电流不要过于陡峭，进而减小尖峰。

这个钳位的过程的本质是一个负反馈环路，如下图所示。给定是TVS的击穿点，被控对象是集电极电位。



## 有源钳位电路的数学模型分析(1)

实际上有源钳位电路可以用自动控制理论进行建模。在控制理论中，有一个重要的术语，叫“反馈”，它的意思是，将某个物理量，引导至前面的环节，从而对该物理量产生影响。

反馈分成两大类：

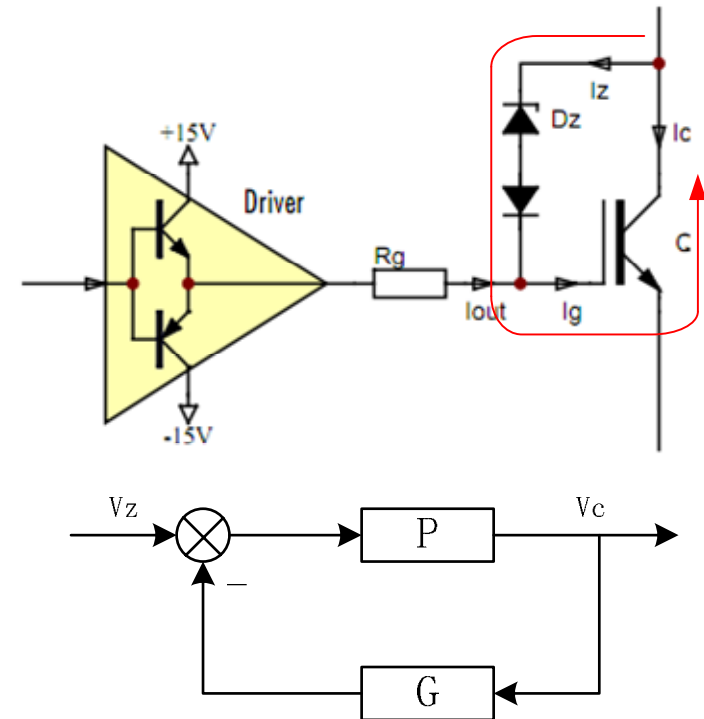
1. 正反馈
2. 负反馈

正反馈的引入会使某物理量**发散**，而负反馈的引入会使某物理量**收敛**。

有源钳位正是利用了负反馈的原理，对集电极电位进行压制，使之收敛于某一给定值。

在实际的有源钳位电路中，反馈是存在的，集电极和门极之间通过一个回路建立了联系。

由于集电极的相位与门极的相位总是相反的，相差180度，（门极电位向上时集电极电位向下），所以反馈系统中存在一个“负号”，因此这是一个负反馈。



## 有源钳位电路的数学模型分析(2)

右下图为有源钳位电路的控制环路的数学模型：

$V_z$ ：环路给定值，实际为TVS管的击穿电压；

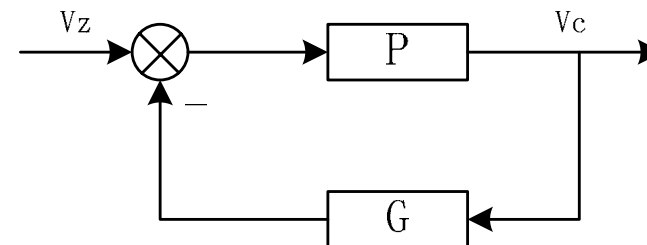
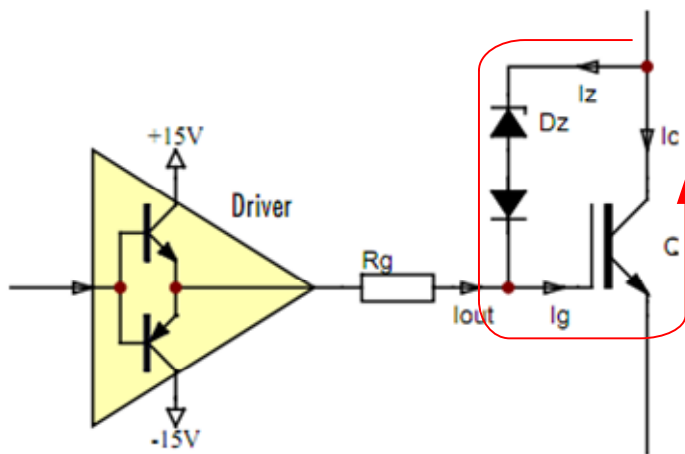
$V_c$ ：被控对象，实际为IGBT的集电极电位；

$P$ ：环路的前向传递函数，可以理解为门极对集电极的影响能力，是IGBT芯片内部的行为；

$G$ ：环路的反馈传递函数，可以理解为集电极信号被传达到门极时所经过的路径的行为；

环路的带宽：这是指环路对被控对象的响应速度，如果被控对象变化速度很快，那么环路的速度必须比被控对象更快，否则就没有办法对被控对象进行控制。在这个电路里，如果带宽不够，其具体表现为，集电极电位钳不住。

所以，有源钳位电路必须是高带宽环路。



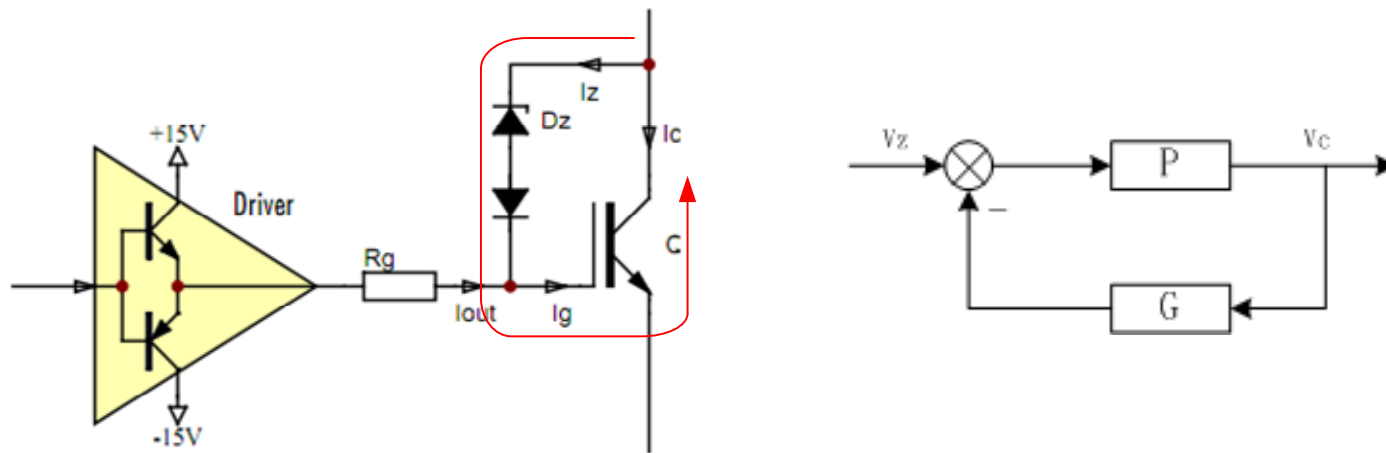
## 影响有源钳位电路的速度(带宽)的因素

被控对象(集电极电位)的性质：这是一个速度非常快的模拟量，电压尖峰只会出现100ns~300ns左右，甚至更短；

这就要求，控制回路必须比集电极电位变化更快，才能控制住集电极电位。换句话说，这要求，控制环路的带宽必须很高，是超高速模拟电路。

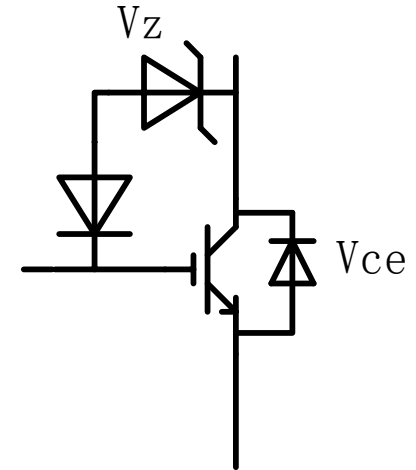
这里有两个因素会影响环路速度，分别是P和G所代表的回路，有以下结论：

1. P所在的回路，是IGBT的门极对集电极的影响能力，这一环节由IGBT芯片决定；
2. G所在的回路，即TVS回路，要求快速。TVS的性能对有源钳位性能影响极大，TVS的品牌和型号需要仔细挑选，且这一路径必须靠近IGBT模块，连接的PCB线要短，否则这个电路的性能会受较大的影响，其直接表现为，电压钳不住。



## 有源钳位电路的关键点

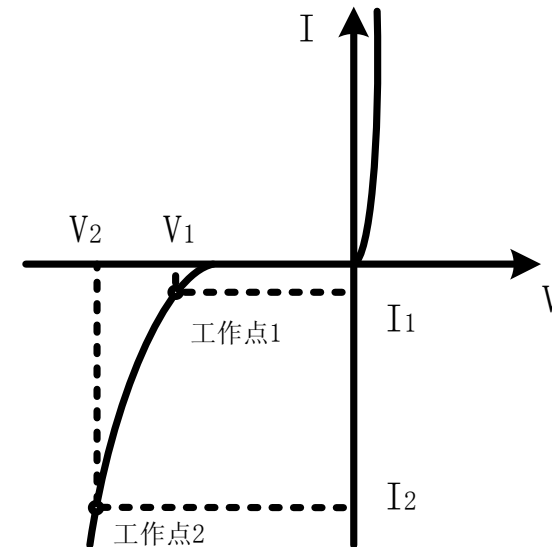
从右上图可知，当有源钳位电路工作时， $V_Z \approx V_{ce}$ ，也就是说，TVS上的电压就是IGBT集电极上的电压，换句话说，能控制住 $V_Z$ ，就能控制住 $V_{ce}$ 。



右下图为TVS管的外特性，其中有2个不同的工作点。工作点1的击穿电流比较小，工作电压比较低，而工作点2的工作电压则比较高。

在有源钳位应用中，我们则希望TVS管能工作在额定的击穿点附近，而不希望TVS被深深地击穿。

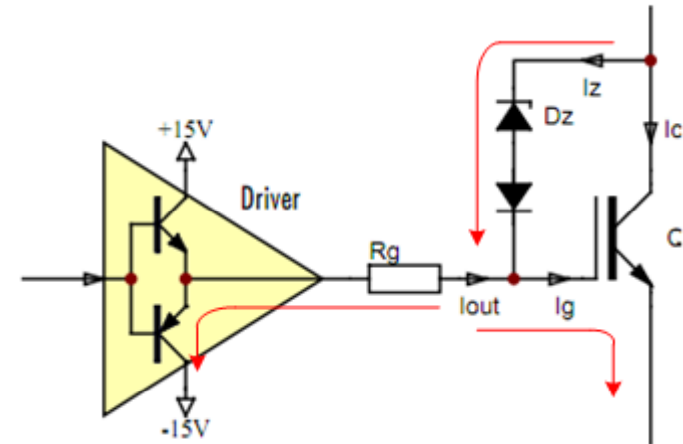
如果TVS被击穿后电流剧烈增大，那么TVS则会从工作点1下探至工作点2，其电压也会强烈上升，这意味着IGBT的CE电压也会上升，这时就达不到IGBT钳位的效果了。



## 基本有源钳位电路的缺点

上页中所表示的基本的有源钳位电路是有明显的缺点的，如右图所示。

首先明确，有源钳位电路工作在IGBT关断的瞬间，在这个时刻里，IGBT驱动器的最后一级推动级的三极管的下管是开着的，而TVS的电流一部分流入门极，另一部分则被这个三极管旁路掉了。



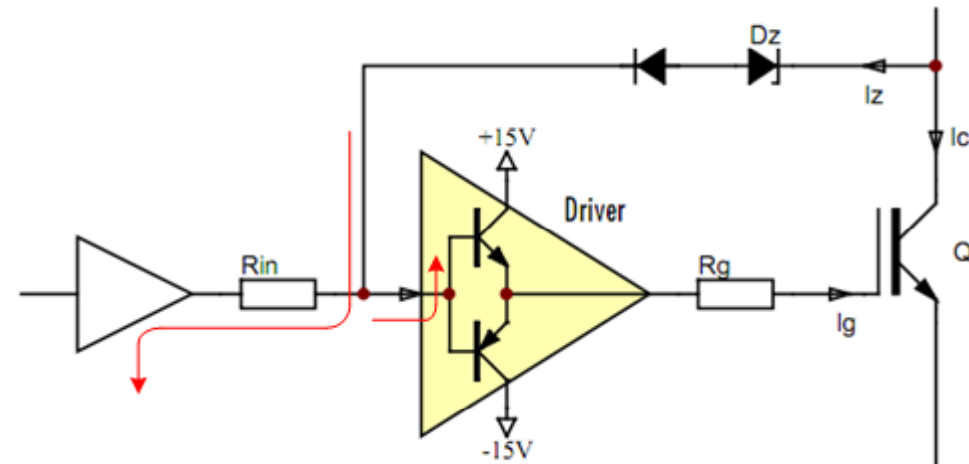
显然，由于这个支路的阻抗很低，因此TVS的电流大部分被这个三极管“吃掉了”。TVS的电流增大导致其击穿电压持续上升，钳位效果就大打折扣了。或者说，电路的有效性降低。

其次，TVS管的功耗非常大，导致必须选取封装较大的TVS，导致物料比较贵，难以购买，误差偏大，结电容过高等缺点。



## 改进的有源钳位电路(1)

这个电路的特点是，将TVS的电流引至推动级的前级，这相当于给TVS的电流增加了一级增益。这可以减少流过TVS的电流，提高这个电路的性能。



但这个电路最大的缺点是：

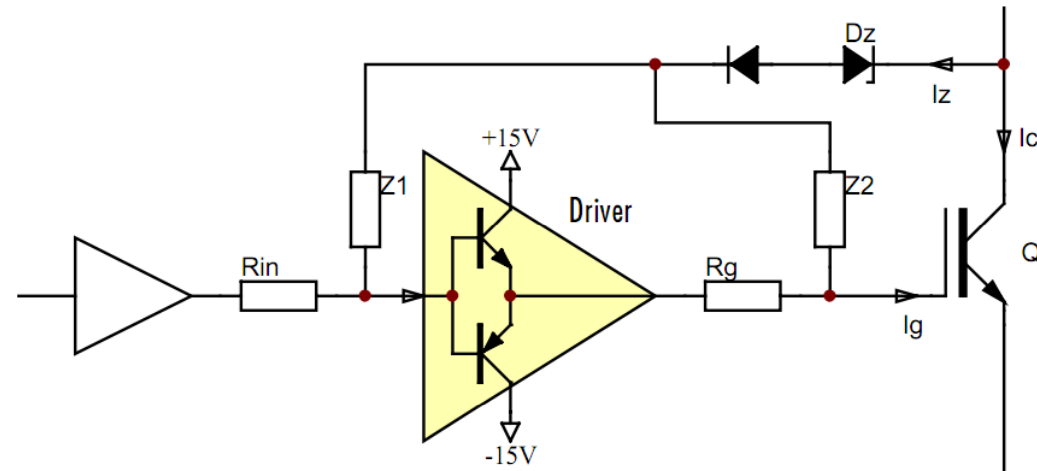
有源最后一级的推动级（三极管推挽电路），有较大的时间延迟，相位滞后，会使前面所说的P环节的速度下降，导致电路变慢，使集电极电位不能被及时钳住。电路的效果不好。

## 改进的有源钳位电路(2)

这个电路增加了一个内反馈回路，使电路的动态性能更好。TVS的电流很快就能流入门极，电路的响应更快。图腾柱推动级的加入为TVS提供了电流增益。

这个电路的缺点是，虽然TVS的电流得到了一定程度的减小，但最前级驱动仍然存在电流旁路。TVS的工作点仍然不够优化。

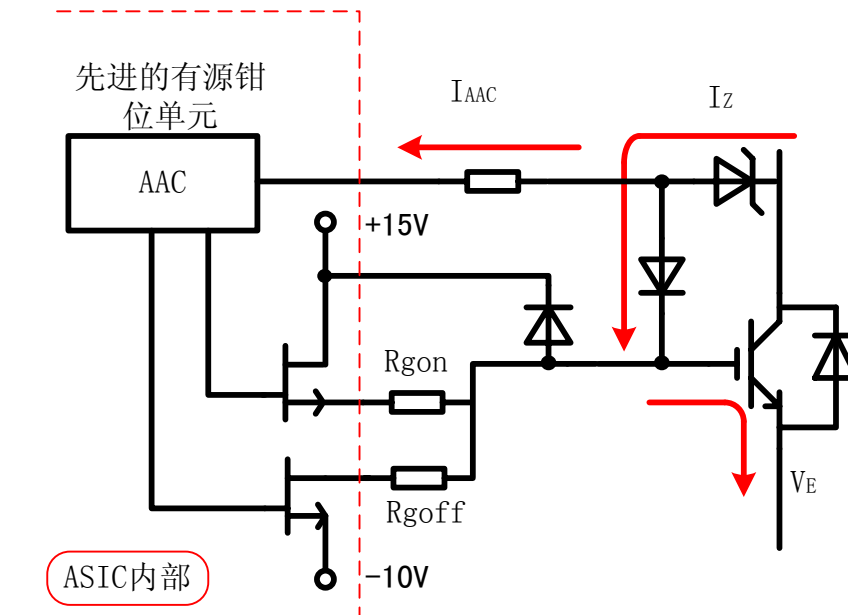
这种电路在SCALE1中的即插即用型驱动器产品已经在使用，例如，1SD536F2等。



## CONCEPT公司推出的“Advanced Active Clamping”

右图就是CONCEPT公司推出的基于SCALE2芯片组的Advanced Active Clamping的功能示意图。

当TVS被击穿时，电流 $I_{AAC}$ 会流进ASIC（专用集成电路）的AAC单元。该单元会根据 $I_{AAC}$ 的大小操纵下管Mofset。当该电流大于40mA时，下管Mofset开始被线性地关断，当电流大于500mA时，下管Mofset完全关闭。（以上电流数值为约数）



此时门极处于开路状态， $I_z$ 会向门极电容充电，使门极电压从米勒平台回到+15V，从而使关断电流变缓慢，达到电压钳位的效果。这个电路的特点是TVS的负载非常小，TVS的工作点非常接近额定点，钳位的准度及电路的有效性大大提高。



## Advanced Active Clamping 的实际表现(1)

右图是关断7500A电流（短路测试）时产生的有源钳位动作。

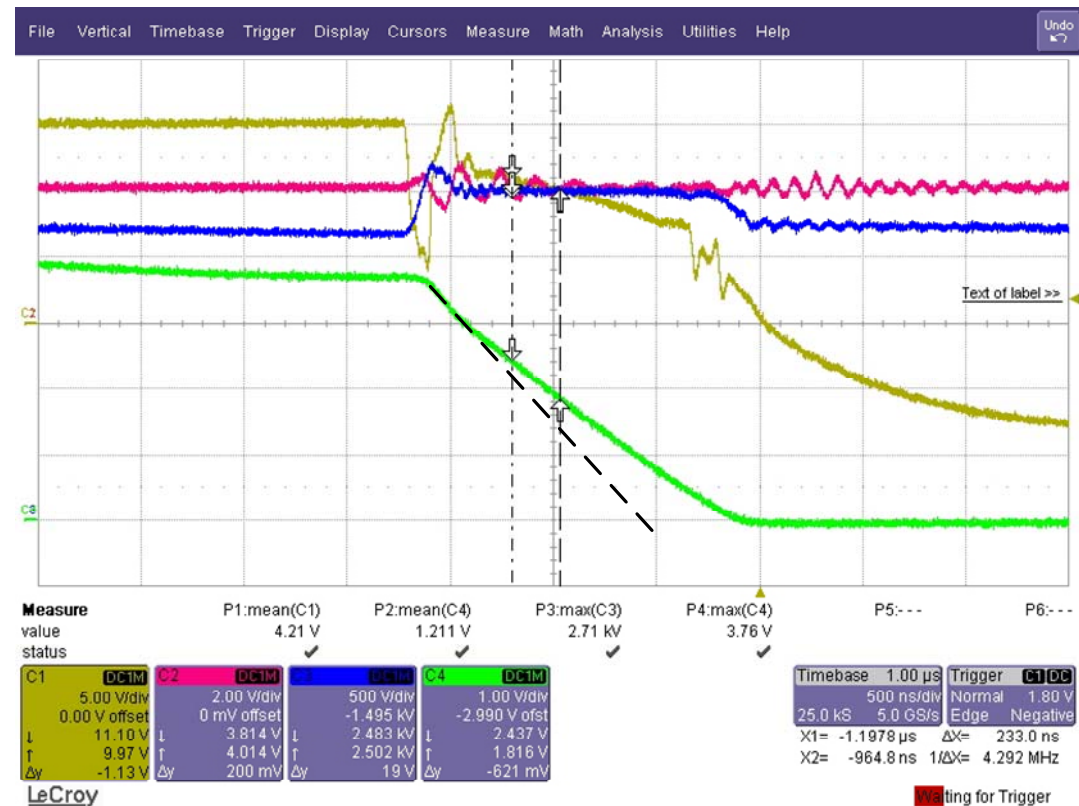
黄线为 $V_{ge}$ ;

蓝线为 $V_{ce}$ ;

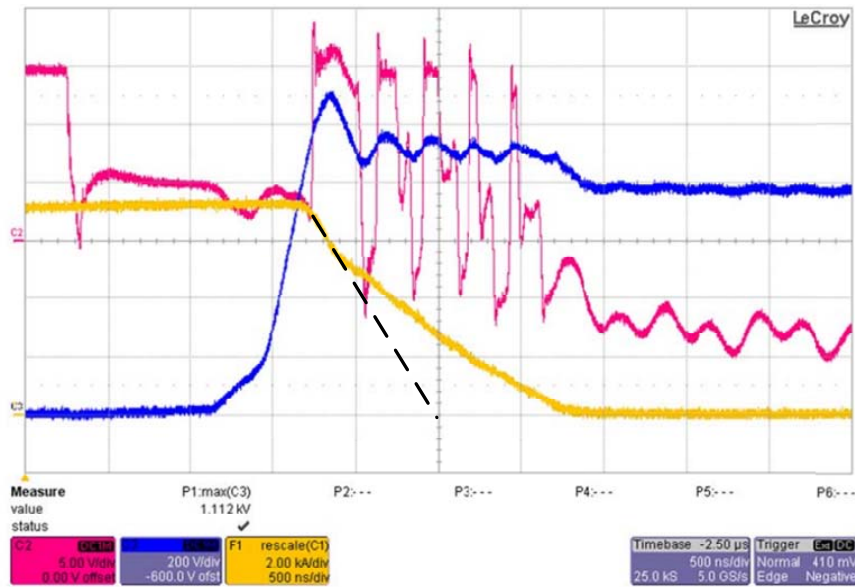
绿线为 $I_c$ (2KA/格)

可以看出:

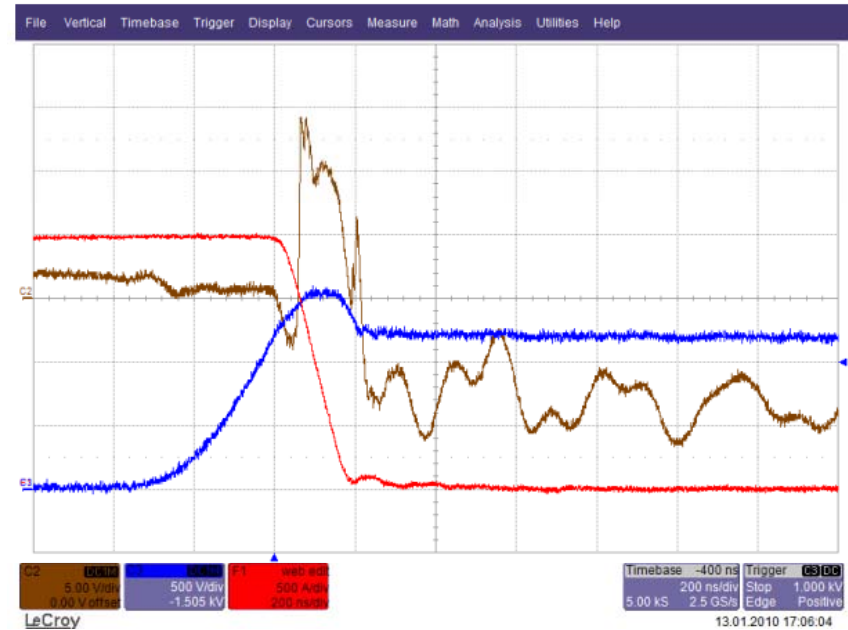
1. 门极波形从15V下跳时， $I_c$ 开始下降，同时产生了电压尖峰
2. 电压尖峰最高到达约2600V，然后被钳在2500V
3. 电流在下降过程中的斜率被改变了
4. 通常需要500ns就能关断的电流用了1.5 $\mu$ s才被完全关断



## Advanced Active Clamping 的实际表现(2)



某3600A/1200V模块，  
关断7200A@800V  
极其强烈的效果



某1000A/1700V模块，  
关断2000A@1200V



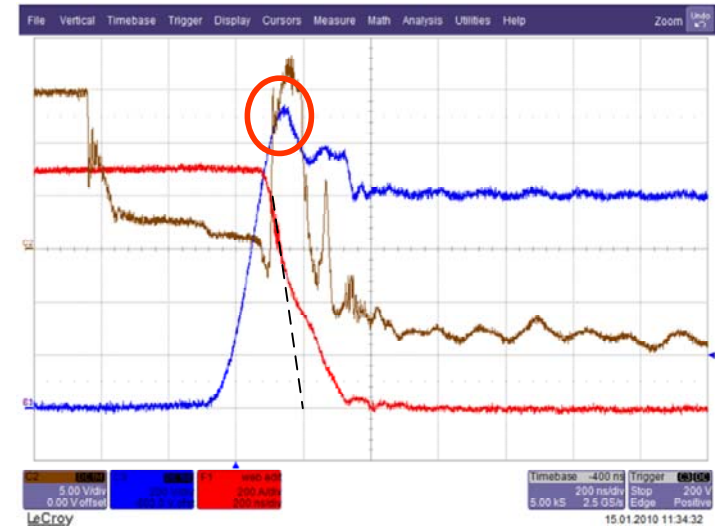
## 有源钳位电路的超调现象

右图是某450A/1200V的IGBT模块在关断两倍额定电流及短路电流时，有源钳位电路动作的情况。驱动器为2SP0115T-12。可以看到，有源钳位动作时，集电极电位实际上最终会到达一个比设定钳位点更高的电压值。

这是因为，有源钳位电路必然存在超调。

有源钳位电路的环路起作用的条件是：集电极电位达到击穿阈值。根据环路的原理，这个信号需要通过TVS传达给门极，然后门极再影响集电极，才能将其钳住。这个过程是需要时间的，在这段时间内，集电极电位仍然会继续上升，这就造成了超调。其本质原因是：控制环路总是滞后于被控对象。

某450A/1200V模块  
关断900A@800V



同一模块  
短路测试@800V



## 有源钳位电路的本质的阐述

IGBT在工作时，其工作点会在“饱和导通区”及“截止区”之间切换，其实这个过程中，IGBT是要穿越“线性区”的，在线性区中，IGBT的损耗是比较高的。

关断电压尖峰的本质：

IGBT关断时，主回路的杂散电感中所存储的能量都需要有释放的途径，最常见的途径就是产生电压尖峰，在关断的过程中，这些能量都以关断损耗的形式耗散在IGBT上。

然而电压尖峰太高会损坏IGBT，因此，有源钳位就是将能量由高而窄的脉冲，转变成矮而宽的脉冲，这个过程中耗散掉的能量仍然是杂散电感所存储的能量。

有源钳位电路的本质：

驱动器使IGBT的关断过程延长，目的是将杂散电感的能量耗散在IGBT上，或者说“让IGBT在线性区里多待一会”。



## 有源钳位电路可以每脉冲动作吗？

在实际应用中，有可能会遇到杂散电感比较大的情形，或者是IGBT的关断时的 $di/dt$ 很大的情形。例如在使用1200V或1700V，额定电流超过2000A的IGBT，其关断 $di/dt$ 通常都非常可观，即便母排的杂散电感为正常水平，产生的电压尖峰也会很高。

在这种应用下，有可能每次关断都会触发有源钳位电路。但是，这是必要的，否则IGBT就会损坏。

在有源钳位电路每脉冲动作的情况下，压力会落在TVS上，因为每脉冲都会击穿TVS，在TVS上产生损耗，因此TVS的温升是关键物理量。输出电流越大，频率越高，TVS压力越大，前提是有源钳位每脉冲动作。所以，有源钳位每脉冲动作也是可以接受的，只要TVS的温升可以接受。

不过，实际上这种情况非常少见，需要讨论的时候很少。

## 有源钳位动作时会导致桥臂直通吗？

很多人会有一个误解，认为有源钳位动作时就是“把IGBT重新打开”，然后会导致直通，其实这句话的表达有问题。从前面的有源钳位的实际动作中可以看出，有源钳位动作时，实际上IGBT的电流并没有下降到零。所以IGBT并没有关断，“重新打开”的说法是不恰当的。应该改成：有源钳位把IGBT的关断电流的“斜率变小了”。

从时间的角度来说，有源钳位发生的全过程通常不会超过300ns，发生的时刻是IGBT电流下降的时刻。而死区时间通常为3us以上，也就是，有源钳位发生完后3us，另外一个IGBT才会开通，所以这两个事件实际上有很大的时间差，是不会因为有源钳位动作而导致直通发生的。

## 关于TVS与有源钳位门槛的关系

在有源钳位电路中，TVS是最关键的元件。下面以ST公司的SMBJ130A为例进行解读。该器件漏电流为1 $\mu$ A时，电压为130V；其击穿点是电流为1mA时，此时电压为144V~152V。

Order code	$I_{RM} \max @ V_{RM}$		$V_{BR} @ I_R^{(1)}$			
	25 °C	85 °C		min	typ	
	$\mu$ A		V	V		mA
SMBJ130A/CA	0.2	1	130	144	152	1

当6片SMBJ130A串联在一起，则其击穿门槛的最低值为 $144V \times 6 = 864V$ ，典型值为 $152 \times 6 = 912V$ 。可以看出，由于TVS目前的技术水平所限，其击穿点的电压是比较宽的，是一个范围。

TVS的温度特性是正温度特性的，ST公司的SMBJ130A的温度系数大约为+1%；其他品牌的温度系数都能在datasheet中查到。在-40度时，TVS的击穿点比25度时大约下降6%~8%。

## 有源钳位门槛点的设置

因为有源钳位的动作点实际上是一个范围，在CONCEPT产品(即插即用)的datasheet中，通常会给出对母线电压最大值的约束，而不会直接给出有源钳位点的数值。如下图(1SP0635-33)。

DC-link voltage	Switching operation (Note 11)	2200	V
	Off state (Note 12)	2700	V

下图为2SP0320-12:

DC-link voltage	Note 4	800	V
-----------------	--------	-----	---

需要注意，以上截图中讨论的母线电压都是稳态值，不是指的电压尖峰。

通常有源钳位的击穿点的中心值大约为：

1200V IGBT: ~900V

1700V IGBT: ~1320V

3300V IGBT: ~2400V

4500V IGBT: ~3300V

## 有源钳位电路的必要性的评估

通常在大功率的IGBT的应用中，有源钳位的功能是非常必要的，而功率越小，必要性越低。其原因是随着系统的功率变大，IGBT的 $di/dt$ 会增大，且杂散电感也会越大，因此电压尖峰会越高。

下表说明不同IGBT在关断额定电流时的 $di/dt$ 的水平：

IGBT型号	关断额定电流时的 $di/dt$
FF150R12KT4	1500A/us
FF600R12IE4	4000A/us
FF1400R12IP4	7000A/us

在IGBT短路时，关断短路电流的 $di/dt$ 会更高，比关断额定电流要高很多，因此短路时电压尖峰更高。所以有可能出现，驱动器发现了IGBT的短路现象，并且也及时关断，但是由于 $di/dt$ 太高，产生了非常高的电压尖峰，在关断该短路电流后仍然可以打坏了IGBT。这时，有源钳位电路就非常必要。

假设母排杂散电感为100nH，则在7000A/us的电流变化率下，电压尖峰将高达700V。

## 有源钳位电路对母线电压的约束

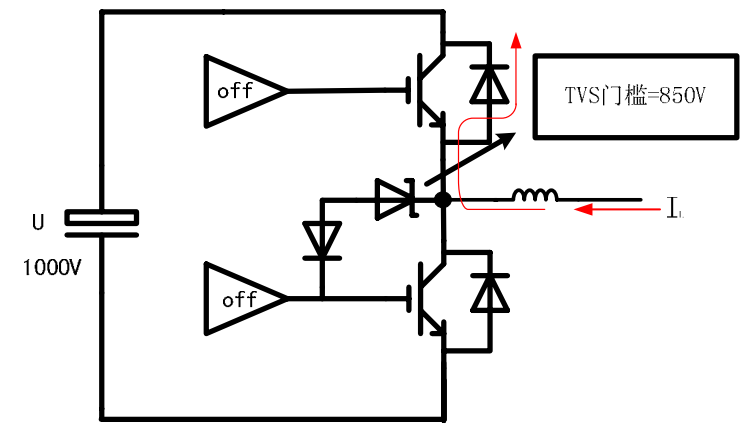
在使用有源钳位电路时，母线电压有非常严格的规定，母线电压的数值一定要低于有源钳位电路的门槛值。这里所指的母线电压不是指的电压尖峰，而是母线电容上的电压，这个电压是一个大惯性物理量。

下面举一个反例，以说明其后果。

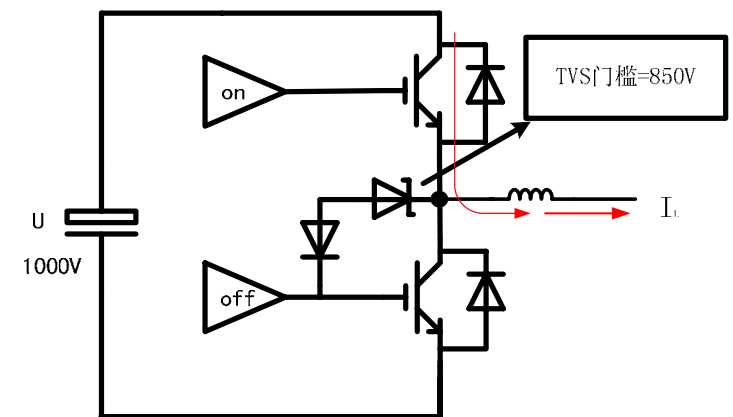
右图中母线为1000V，有源钳位的击穿门槛为850V；当上管二极管续流，电流朝内；或者上管IGBT开通，电流朝外；以上两种情况，下管处于关断态。

此时下管的有源钳位电路会被击穿，TVS的电流会流向门极，门极电位被抬升，导致下管IGBT被打开。此IGBT会工作在线性区，产生很大的损耗，直到最后炸机。

可见，这是非常危险的一种情况，必须避免。



情况1



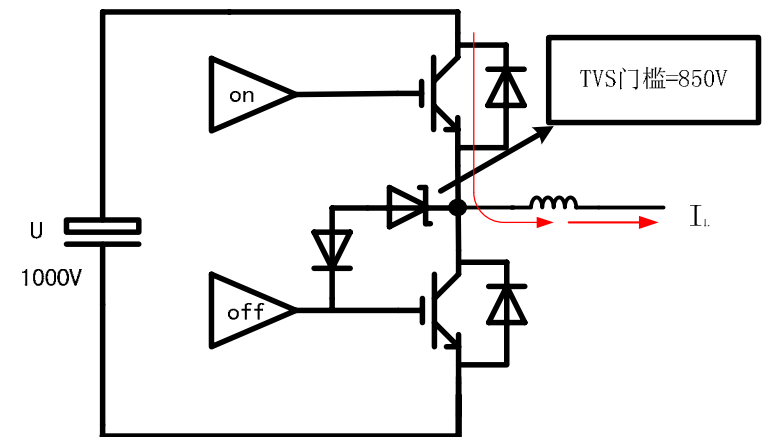
情况2

## 单一门槛的有源钳位电路所存在的问题

本文前面所讨论的有源钳位电路，其击穿门槛都只有一个点，在一些应用中，这会带来严重的问题，例如：

1. HVDC应用中，系统失效时，功率单元母线电压被整流且抬升；
2. 牵引应用中，受电弓与电网脱落，且机车制动，母线电压被抬升；
3. 太阳能应用中，电池板开路电压较高，母线电压偏高；
4. SVG应用中，电网系统故障，功率单元母线电压被整流且抬升；
5. 风电Crowbar中，IGBT静态电压偏高；
6. 电动汽车应用中，电池端直流接触器断开，且汽车制动，母线电压会被抬高；
7. APF应用中，母线电压选取过高；
8. ....

在以上所列的具体应用中，一旦母线电压超过有源钳位的门槛，IGBT就会进入线性区，IGBT上的损耗很大，短时间内就会失效。但是我们不能因为有源钳位有这个问题就放弃有源钳位功能。因此我们需要对这个功能进行改进----**动态有源钳位**。



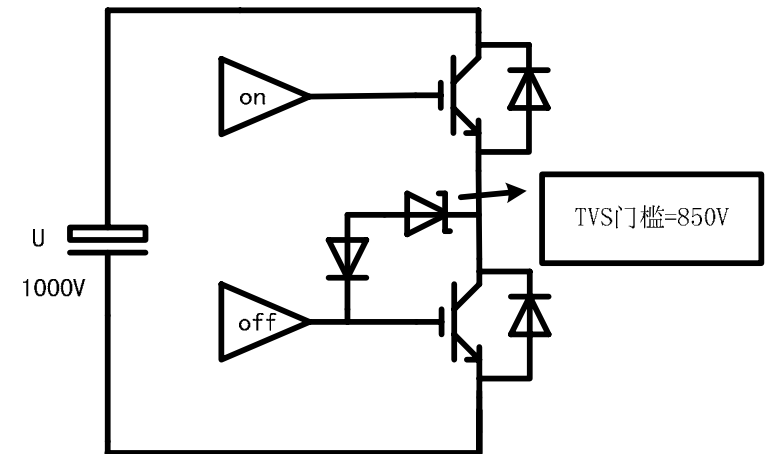
## 双门槛的有源钳位电路的目的

如果把有源钳位的动作门槛设计成两个值，且门槛会随着IGBT的工作状态的变化而变化，这样既能保留有源钳位功能----防护IGBT，又能回避在某些具体应用中带来的问题。

CONCEPT提出了一种新的有源钳位电路---动态有源钳位，可以顺利地解决这个问题。

动态有源钳位电路实现的目标：

1. 在IGBT关断过程中，用合理的门槛值对集电极电位进行钳位，使IGBT的电压尖峰不至于太高而损坏；
2. 在IGBT持续保持关断时，将有源钳位的门槛调高，这样即使母线电压偏高，也不至于碰到第二个更高的门槛点，这样就不会出现前一页所说的问题。



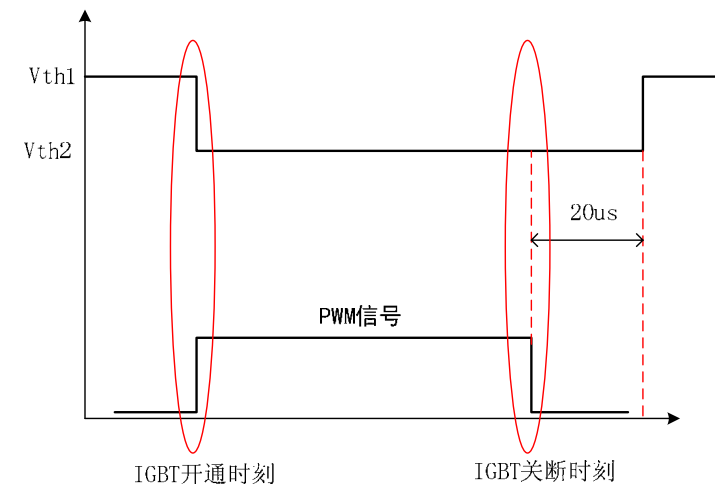


## 动态有源钳位电路的介绍(Dynamic Advanced Active clamping)

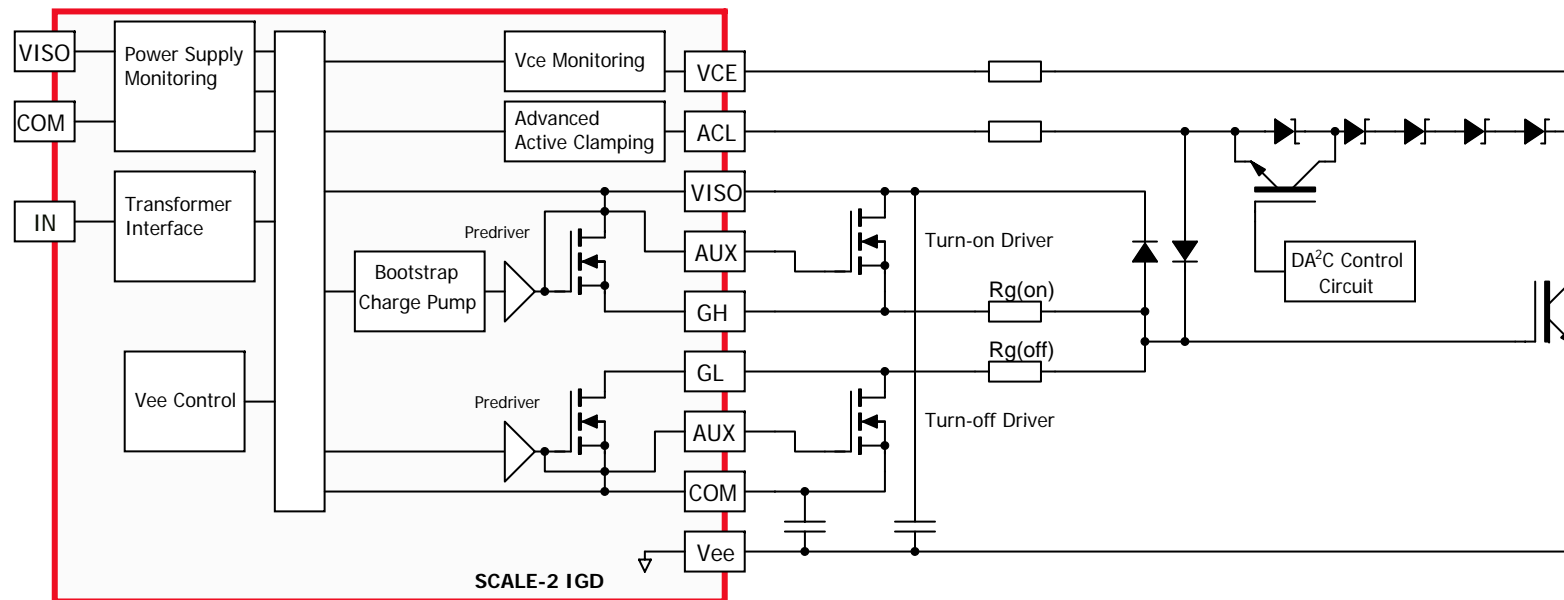
我们将有源钳位的动作门槛设置成动态的， $V_{th1}$ 是高门槛， $V_{th2}$ 是低门槛。在IGBT开通时刻，同步地将门槛降低为 $V_{th2}$ ，在IGBT关断后，延迟一段时间(约15~20us)，然后将有源钳位的动作门槛提高到 $V_{th1}$ 。这样IGBT在导通状态和截止状态时，其有源钳位电路的动作门槛电压是有区别的。这样并不影响有源钳位电路的本意，因为IGBT在关断瞬间，钳位门槛是在 $V_{th2}$ 。用低门槛对IGBT的关断行为进行防护。

如果母线电压因为某种原因而升高，IGBT在关断态时，钳位电路的门槛处在高位，不会发生有源钳位电路动作。

这种方案能较好的解决某些应用中很现实的问题，是一种非常有竞争力的解决方案。



## 动态有源钳位电路的实现方法及其难点



动态有源钳位的实现方法如上图示，部分的TVS上并联了一个小的IGBT，当该IGBT导通时，TVS的门槛就降低了，当IGBT截止时，TVS的门槛就上升了。

这个电路的**难点**：

在于这个电位浮起的IGBT很难被驱动，需要给它的发射极合适的参考电位。

## 软关断电路与有源钳位电路的比较(1)

软关断电路的原理是：在IGBT关断的过程中，用一个较大的电阻对门极的电荷进行释放，从而实现门极电压出现缓慢下降，这样IGBT的电流会缓慢下降， $di/dt$ 会比较小，产生的电压尖峰也会比较小。

所以，软关断电路的**目的**是：  
减小关断过程的电压尖峰。

软关断电路触发的条件：

软关断电路可以在每个关断脉冲都工作吗？答案是不行。因为那样损耗极高。软关断电路的触发条件是IGBT短路故障，也就是说，通常这个功能是用于关断短路电流的时刻。而且这个动作发生后，驱动器一定会报保护信号，机器随后就会停机了。

软关断电路只适用于短路保护时刻！

## 软关断电路与有源钳位电路的比较(2)

- ▣ 软关断电路是一个**开环电路**，它被触发的条件是驱动器检测到短路保护，它只能在这个时候有效。
- ▣ 有源钳位电路是一个**闭环电路**，它被触发的条件是集电极电位到达TVS击穿门槛，它在任何时候都有效。
- ▣ IGBT在关断1倍额定电流或者2倍额定电流时，产生的电压尖峰已经很高，但此时关断IGBT，并不会触发软关断功能，不过IGBT可能会面临高电压尖峰的风险；
- ▣ 对于有源钳位功能，无论IGBT关断多大的电流，无论是否短路保护或者霍尔器件发出的过流保护指令，只要电压尖峰到达TVS击穿门槛，电路就会工作，对IGBT进行防护；

总结：

软关断功能所覆盖的场合很单一，在更多的场合下，它不能有效动作；

有源钳位功能由于是闭环系统，在所有的场合下都能有效工作进行IGBT防护。