

2011-11-13

Rev 02

## IGBT 保护问题

Winson Wei (魏炜)

CT-Concept Technologie AG - Switzerland

Wei.wei@igbt-driver.com

Mobile: 186-8878-5868

## 内容提要

### 基础知识

- ▶ 如何能损坏IGBT模块
- ▶ 用门极驱动器来保护IGBT模块
- ▶ 关于短路的定义

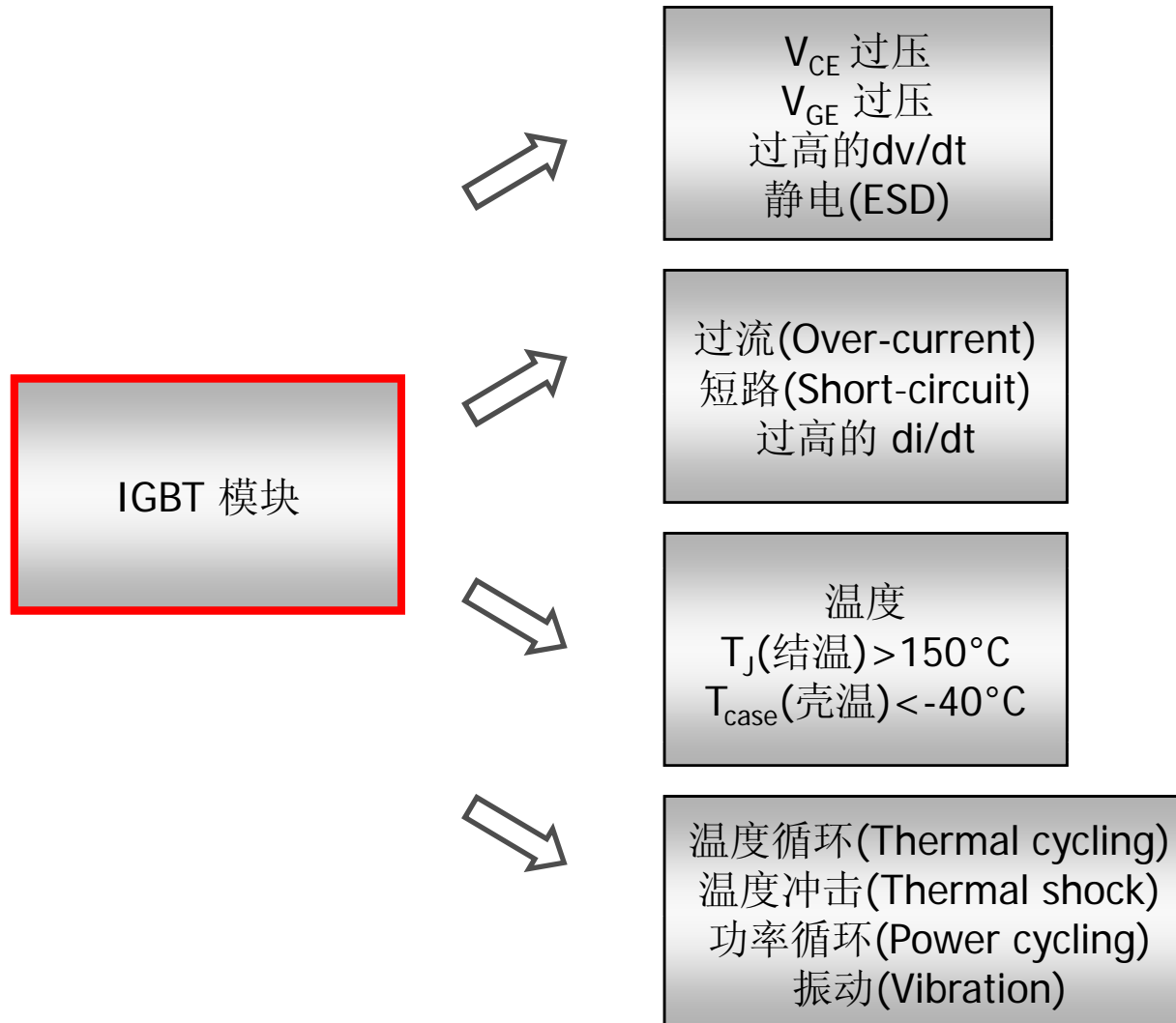
### SCALE 产品家族

- ▶ 短路保护
- ▶ 有源钳位

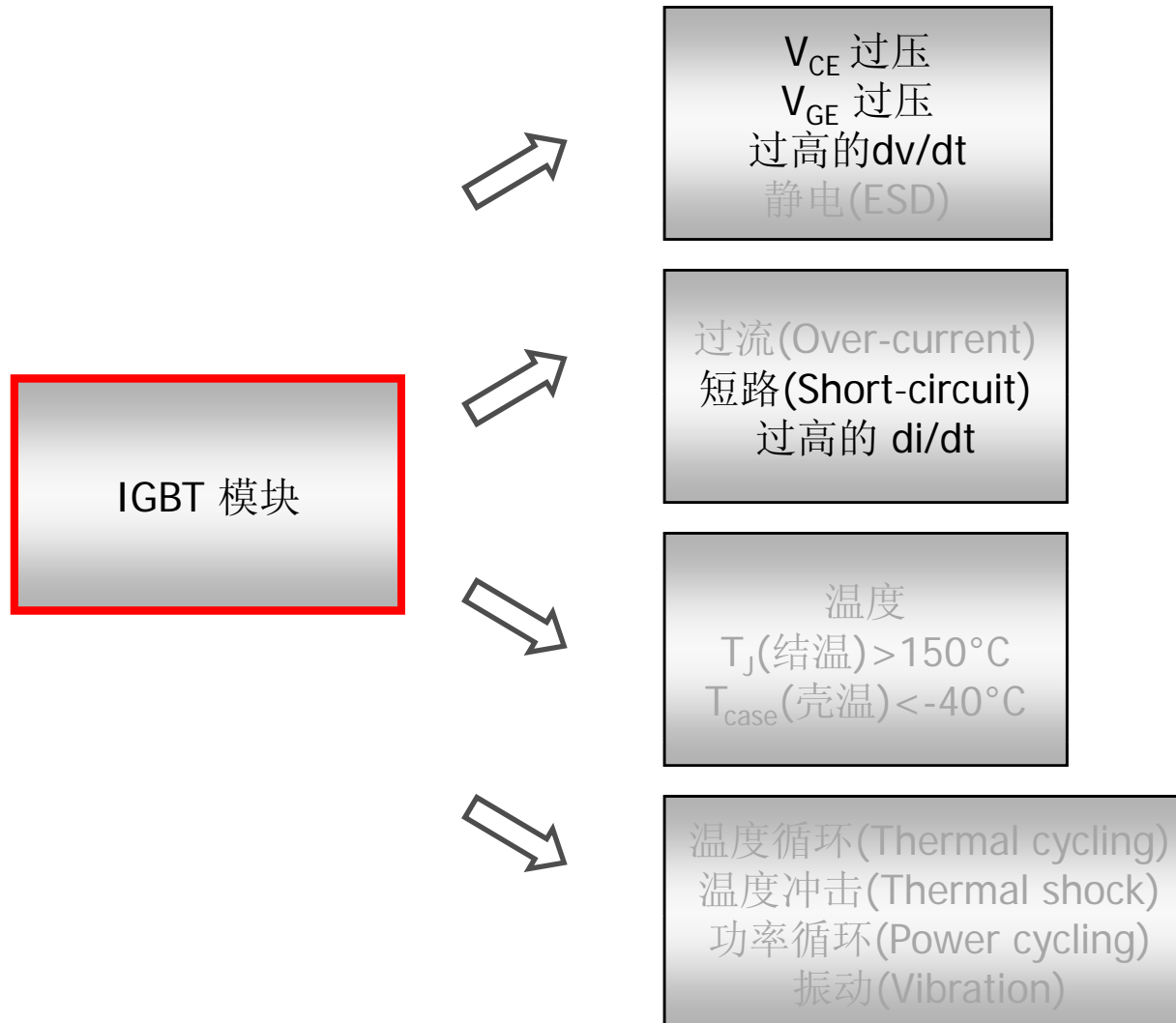
### SCALE-2 产品家族

- ▶ 短路保护
- ▶ 先进的有源钳位
- ▶ 门极钳位
- ▶ 3电平拓扑的支持

# 如何损坏IGBT模块



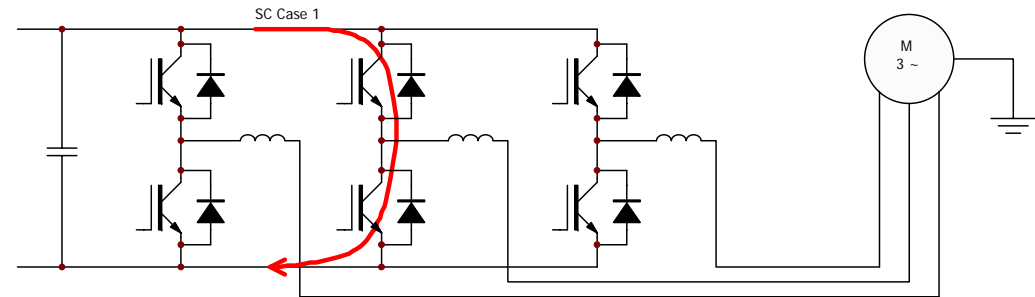
# IGBT 驱动器所能保护的项目



## 短路的定义 (1)

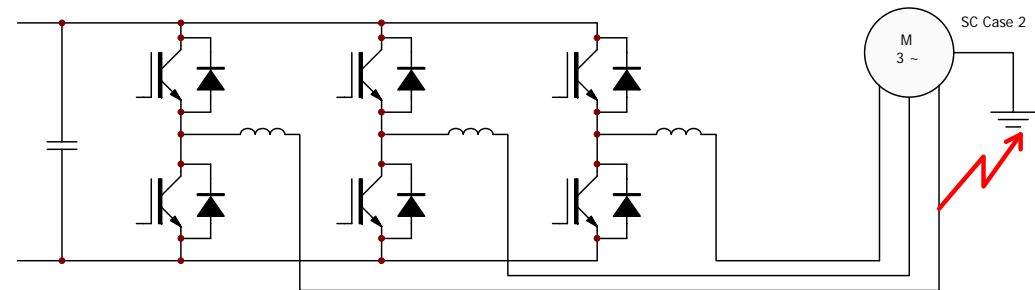
### 桥臂内短路 (直通)

- 命名“一类”短路
- 硬件失效或软件失效
- 短路回路中的电感量很小 (100nH级)
- $V_{CE\ sat}$  检测



### 桥臂间短路 (大电感短路)

- 命名“二类”短路
- 相间短路或相对地短路
- 短路回路中的电感量稍大(uH级的)
- 可以使用  $V_{ce\ sat}$ ，也可以使用霍尔，根据电流变化率来定
- 这类短路的回路中的电感量是不确定的



## 短路的定义（2）

IGBT发生短路时，描述短路电流的数学表达式如下，这是一个线性方程。它表示，在短路发生时，电流的绝对值与电压，回路中的电感量，及整个过程持续的时间有关系。

$$I = \frac{U \cdot t}{L} \quad \longrightarrow \quad \frac{di}{dt} = \frac{U}{L}$$

绝大部分的短路，母线电压都是在额定值的，影响短路电流的因素主要是“短路回路中的电感量”。因此对短路行为进行分类定义时，短路回路中的电感量是主要的分类依据。

如果短路回路中的电感量再继续增大，那么电流变化率就变得更低，此时就不是短路了，变成“过流”了。这时驱动器是察觉不到这种异常状态的，因此在系统中需要电流传感器来感知电流的绝对数值，从而进行“过流保护”。我们认为，通常IGBT驱动器是不能进行过流保护的。

二类短路与过流之间没有明显的界限，学术上没有进行定义，在工程上，可以做一个很粗略的假设：10A/us以下的电流变化率视为“过流”。

## 短路保护和过流保护的意義及其区别

通常我们说的短路保护和过流保护是不一样的，是两个很不一样的概念，不应该混为一谈。

短路分为一类及二类两种，但这两种短路都有一个共同点，那就是，IGBT会出现“退饱和现象”，当IGBT一旦退出饱和区，它的损耗会成百倍的往上升，那么允许持续这种状态的时会非常苛刻了，只有10us，我们需要靠驱动器发现这一行为并关掉门极。

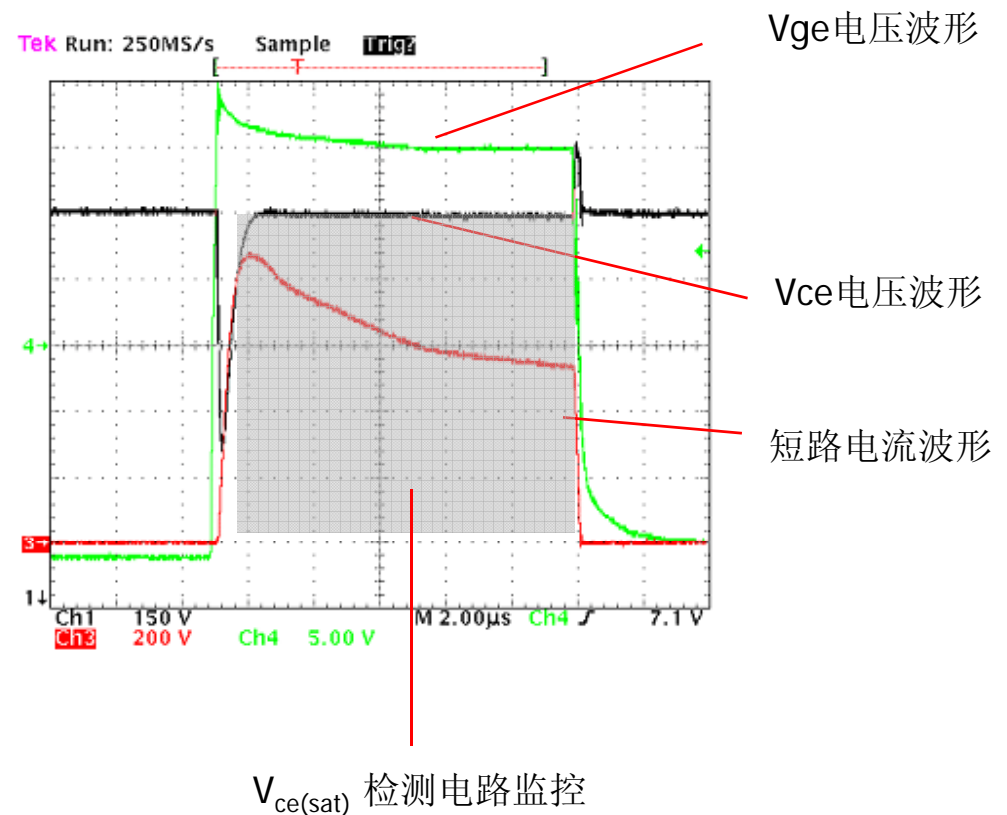
IGBT过流的情况则是，回路电感较大，电流爬升很慢（相对于短路），IGBT不会发生退饱和现象，但是由于电流比正常工况要高很多，因此经过若干个开关周期后，IGBT的损耗也会比较高，结温也会迅速上升，从而导致失效。在这时，IGBT驱动器一般是不能及时发现这一现象的，因为IGBT的饱和压降的变化很微弱，驱动器通常识别不到这种变化。所以需要靠电流传感器来感知电流的数值，对系统进行保护。

所以，我们认为，IGBT驱动器是为了解决短路保护，而过流保护则是由电流传感器来完成。

## 一类短路

发生一类短路时，IGBT的电流会快速上升，当电流上升到一定数值时，（一般为4倍额定电流），IGBT会发生退饱和现象，其标志是IGBT的电压会迅速上升至直流母线电压。

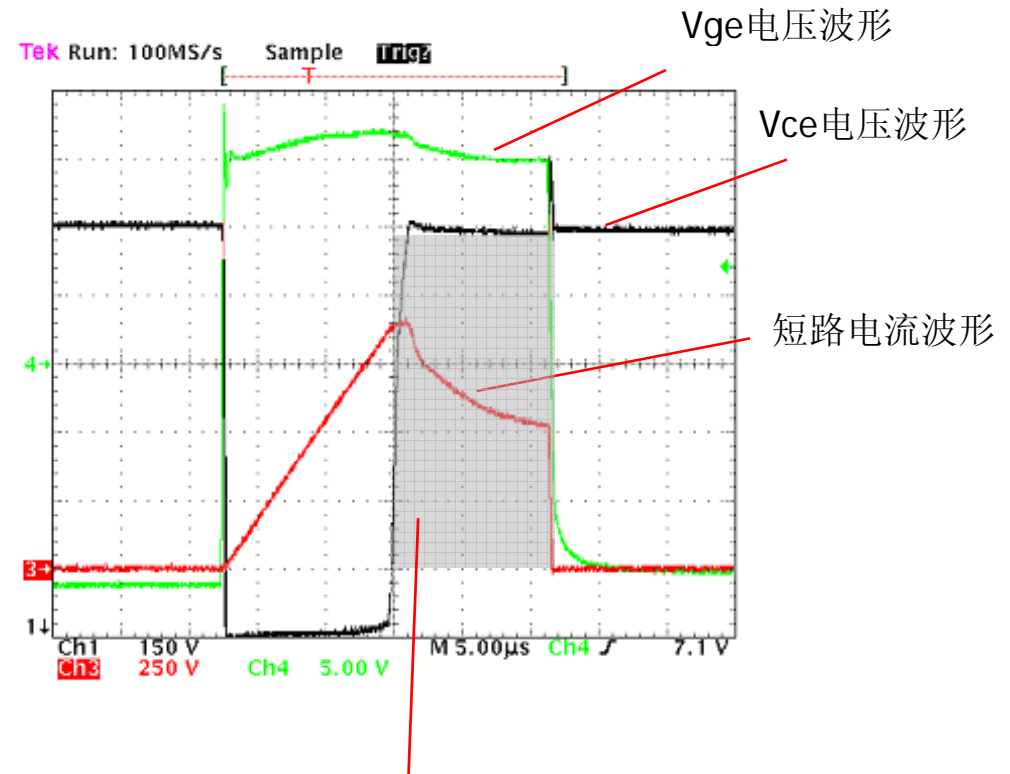
当IGBT退出饱和区后，IGBT的电流为4倍额定电流（此倍数与芯片类型有关），电压为母线电压，（外电路的所有电动势都压在IGBT上），IGBT芯片的损耗非常大，根据规格书，其最多能耐受10us的短路状态。驱动器需要在此时间内把IGBT关掉，此时的关断是完全安全的。





## 二类短路

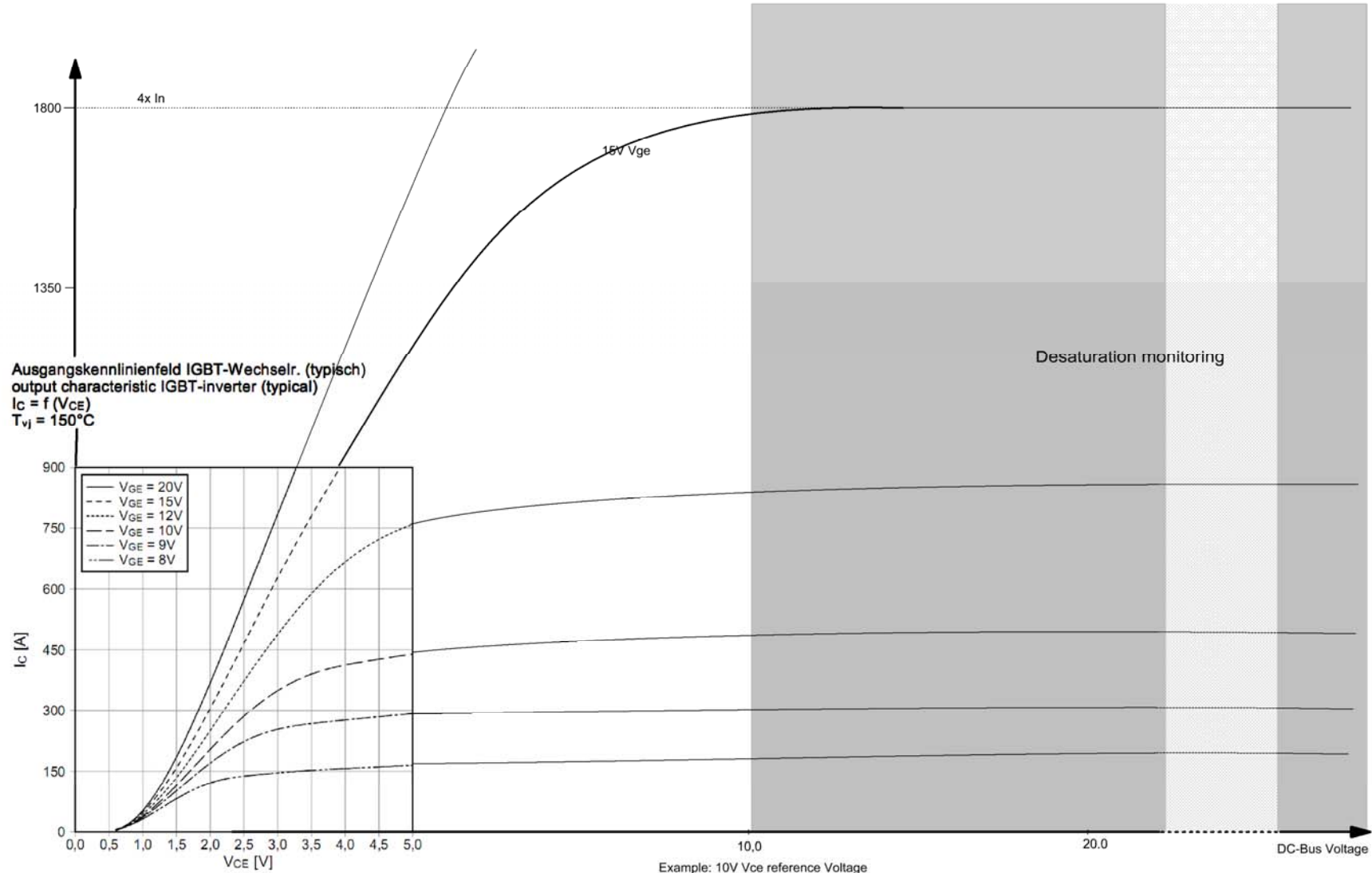
发生二类短路时，由于回路的电感量稍大，电流爬升的速度慢了一些，(比一类短路慢，但实际还是很快的)，门极脉冲打开时，IGBT的Vce下降至饱和压降，随着电流进一步加大，饱和压降轻微上升；当电流到达“退饱和点”时，Vce迅速上升至直流母线电压，我们把Vce上升的过程称为“退饱和”行为。当IGBT退出饱和区后，其损耗要比未退饱和前高数百倍，因为Vce从几伏上升至几百伏，而电流则没有明显变化。从退饱和算起，10us内，必须关断IGBT。



$V_{ce(sat)}$  检测电路监控

另外，还需要注意的是，当IGBT电流上升的过程中，Vge也在上升，这是一种米勒效应，IGBT在短路时，门极电压有被向上抬升的趋势。

# IGBT 的外特性



## 从IGBT 的外特性图中可以读出的信息

图中左下角的图是IGBT的datasheet中给出的外特性曲线，通常这个图只给出额定电流的2倍的曲线，电流再大的部分属于定性不定量的示意图。当电流等于450A，即1倍额定电流时， $V_{cesat}=2.5V$ ；在2倍额定电流时， $V_{cesat}=3.9V$ ；在3倍额定电流时， $V_{cesat}=5\sim 6V$ ；当电流达到4倍额定电流时，IGBT会承受住外部电压的所有值。

这张图可以看出：

1. IGBT在某个固定的门极电压下，其电流达到一定高度就上不去了。这说明，IGBT在短路时，电流会被限制在一个稳定的水平，其数值大约为IGBT额定电流的4倍，（该数值与IGBT的芯片类型有关系）。
2. 门极电压可以强烈地影响IGBT短路电流的数值，门极电压较低时，短路电流会比较低，门极电压升高，短路电流也会升高。
3. IGBT的电流在1倍至3倍之间变化， $V_{cesat}$ 的变化是非常微弱的，只有几V的差别。
4. IGBT在退饱和后， $V_{cesat}$ 会有显著变化。
5. IGBT在短路时，实际上进入了线性区。

## IGBT的退饱和行为的介绍

IGBT的外特性的形状实际上和三极管及MOSFET的外特性是相似的，在IGBT的线性区，门极电压与短路电流的关系是线性的。

IGBT退饱和行为，其字面的意思是“退出了饱和区”，实际就是“进入线性区”的另外一种说法。

IGBT的电流如果持续增大，当到达某一个点（退饱和点）时，IGBT的 $V_{ce}$ 会发生显著变化，会在非常短的时间内（例如几百纳秒内）上升至直流母线电压。退饱和行为的标志就是 $V_{cesat}$ 上升至直流母线电压。

$V_{cesat}$ 在饱和区内的变化是非常微弱的，如果想利用饱和压降的变化来辨识IGBT的电流是很困难的，通常我们只辨识IGBT的退饱和行为。

## IGBT的短路安全工作区(SCSOA)

在IGBT的datasheet中，(以英飞凌的FF450R12ME4)为例，IGBT的短路性能是有所定义的，我们可以认为这是“短路安全工作区”。见下图。

Kurzschlussverhalten SC data	$V_{GE} \leq 15 \text{ V}, V_{CC} = 800 \text{ V}$ $V_{CEmax} = V_{CES} - L_{sCE} \cdot di/dt$	$t_p \leq 10 \mu\text{s}, T_{vj} = 150^\circ\text{C}$	Isc	1800	A
---------------------------------	---	---	-----	------	---

定义这个数值时使用的是一类短路，其意义是：在母线电压为800V，门极电压小于等于15V，结温为150度的情况下，施加一个宽度为10us的脉冲，在第10us时，IGBT的电流大约为1800A。并且说明，这样的测试是安全，是可以重复的。

实际上定义这个测试背后的约束条件是在短路时IGBT芯片上的能量，在IGBT短路时，IGBT会退出饱和区，所以其Vce=800V，电流基本稳定在1800A，在10us内，能量为： $E=U \cdot I \cdot t=800\text{V} \cdot 1800\text{A} \cdot 10\mu\text{s}=14.4\text{J}$ 。也就是说，短路时，IGBT能扛住14.4焦耳的能量。

## IGBT短路时的关断风险

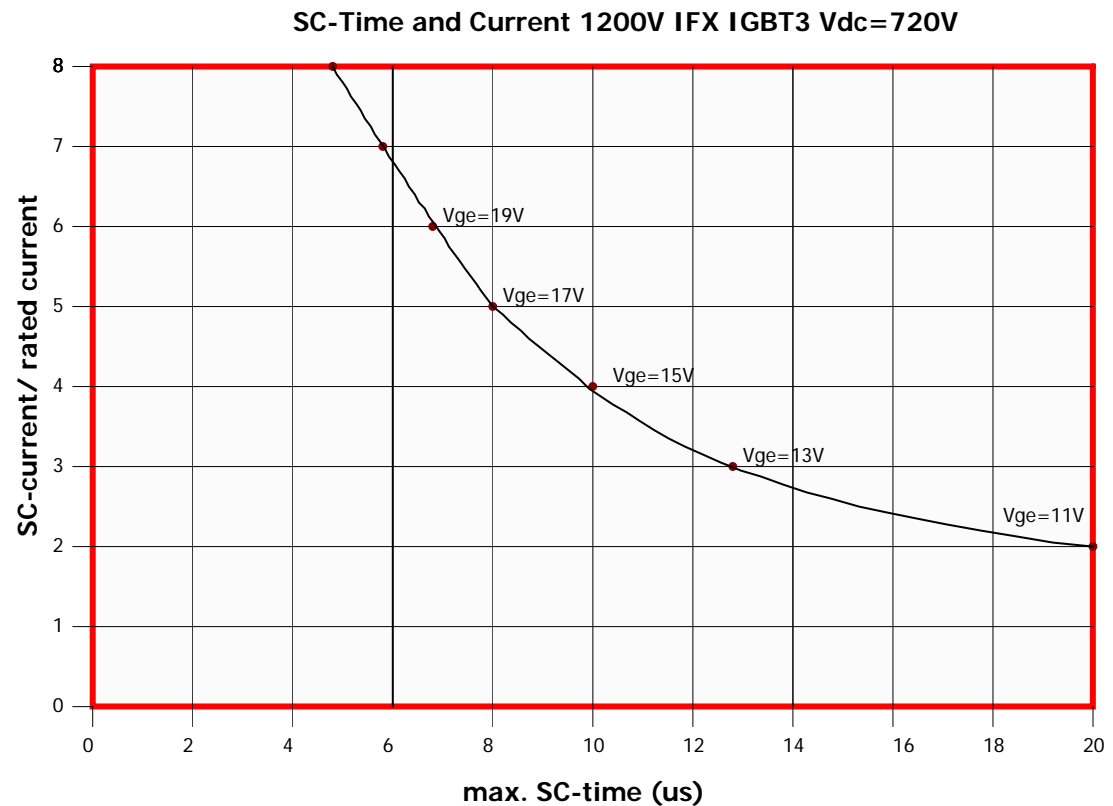
IGBT发生短路时，电流上升至4倍额定电流以上，最终IGBT是要将这个电流关断掉的，这时的电流的数值比平常变流器额定工作时的电流高了很多，所以此时产生的电压尖峰也是非常高的。

为了防止电压尖峰损坏IGBT，还需要引入有源钳位电路，但并不是所有的驱动电路都需要配备有源钳位功能，容量比较大的IGBT，就比较有必要配置此电路。

## IGBT 短路允许时间与电流的关系

❏ 短路允许时间及短路电流是门极电压的函数  $t_{CS}; I_{CS} = f(V_{GE});$

从右图可知，当门极电压越高，短路电流倍数越高，相应地，短路允许时间会变少。反之，短路允许时间会增多。如果在发生短路时，将门极电压变低，IGBT的短路电流会变小，允许持续的时间也增多。

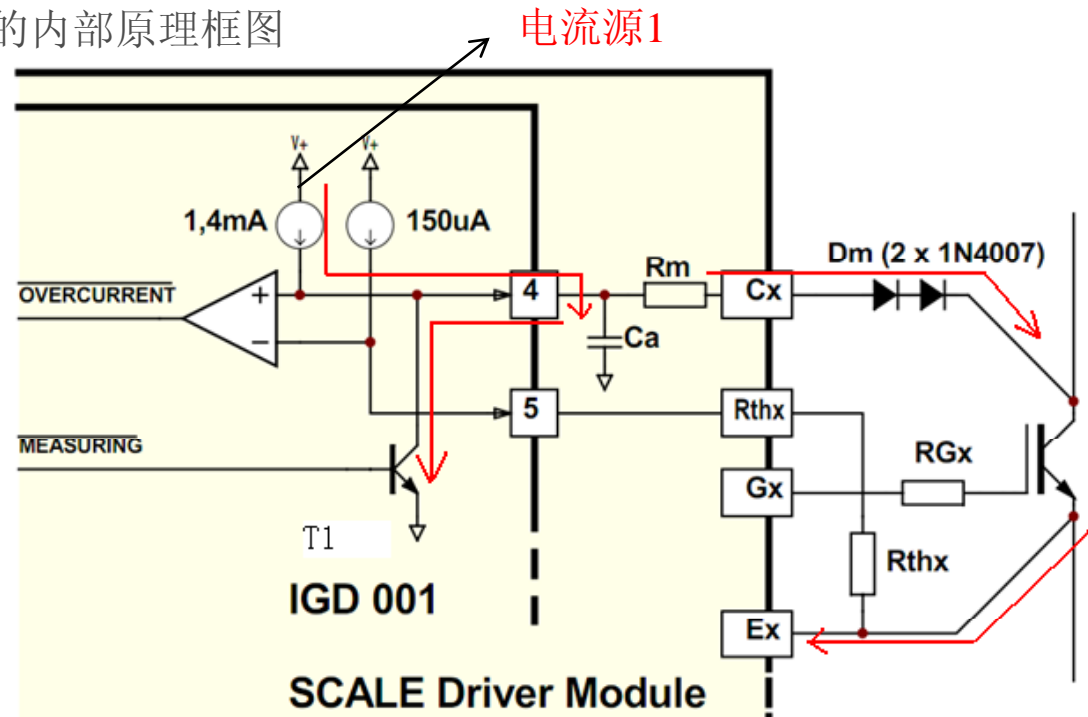


## SCALE 驱动器的短路保护原理(1)

CONCEPT 第一代SCALE 驱动核的内部原理框图

右图所示的电路是经典的IGBT保护电路，其原理是：

1. 当IGBT关断时，T1导通，电流源1被T1旁路，Ca的点位被钳在低位，比较器不翻转；
2. 当IGBT进入开通的过程中，T1截止，IGBT进入饱和导通，电流源1流过Rm，Dm及IGBT形成回路，比较器不翻转。



3. 当IGBT出现短路时，会退出饱和区，Vce快速上升至直流母线电压，Dm马上截止，电流源1则向Ca充电，Ca的电位线性上升，到达阈值时比较器翻转。



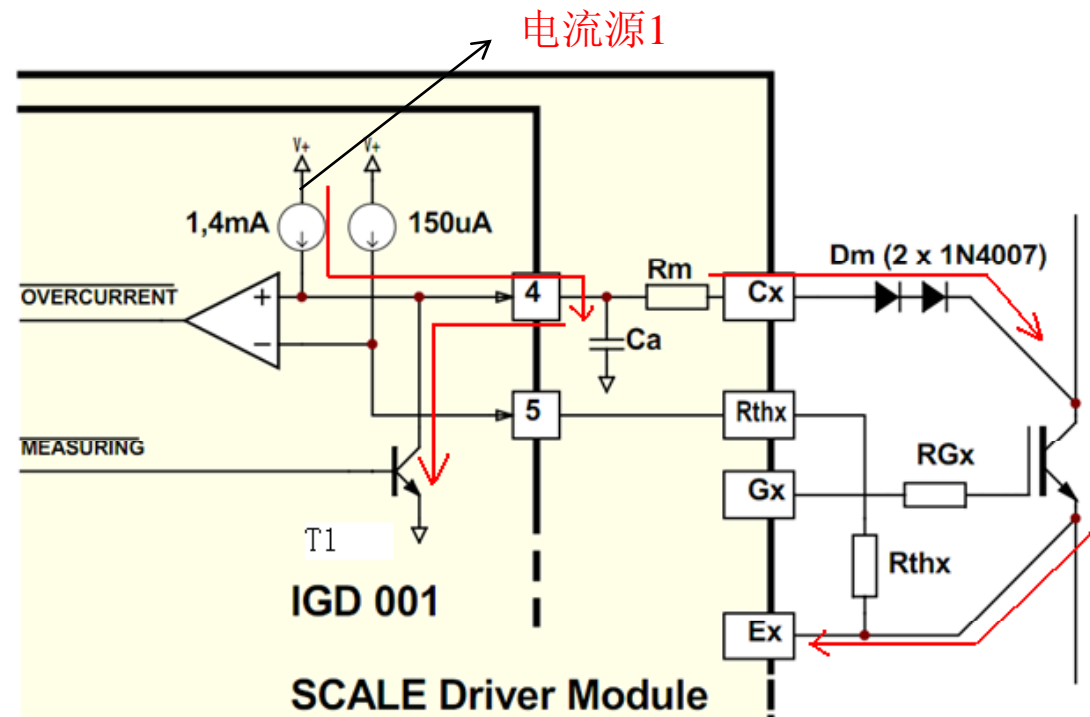
## SCALE 驱动器的短路保护原理(2)

这个电路的关键点:

1. 电容Ca的作用是定时，因为被恒流源充电，其电压线性增长，表达式为:

$$U = \frac{I \cdot t}{C}$$

2. 二极管Dm的截止时刻就是IGBT退出饱和区的起始时刻，同时也是电容被充电的起始时刻
3. Dm的截止时刻可以看成是驱动器发现IGBT短路时刻



4. 从这个时刻起，IGBT就只能耐受10us的时间，因此Ca承担着定时的作用，在10us内比较器就要翻转，从比较器翻转到IGBT关断，中间不再有延迟。
5. Ca定时的时间长短由电流源数值，电容值以及比较门槛决定。

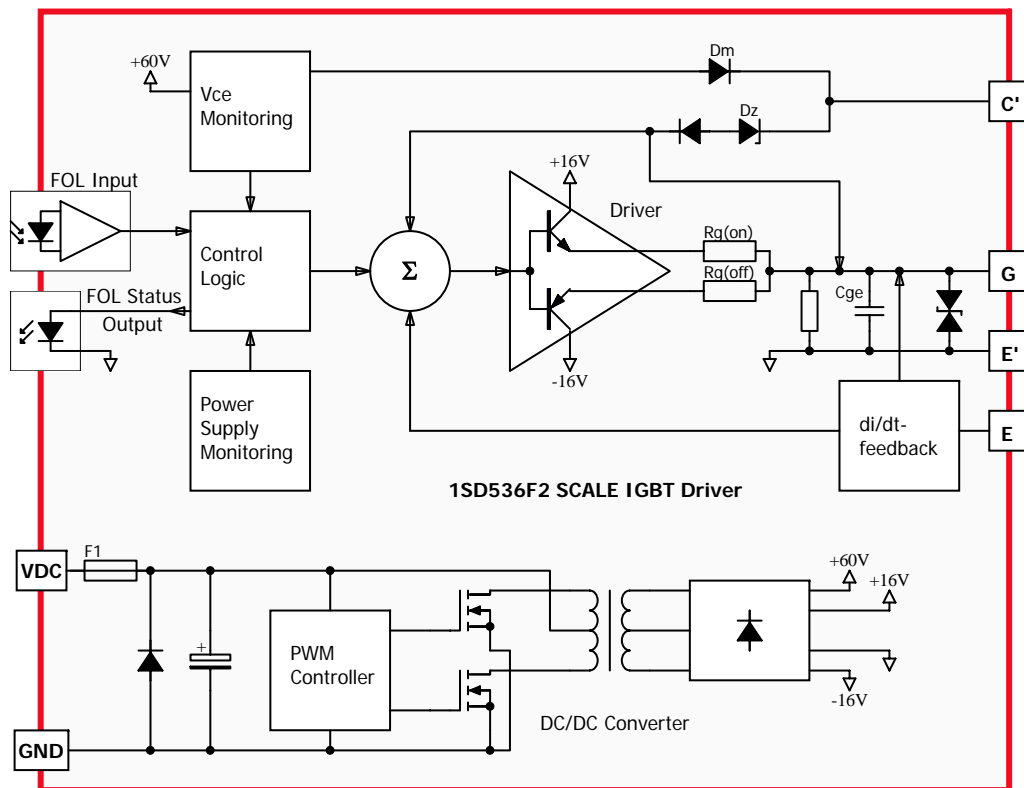
## 驱动器的经典短路保护电路常见的理解误区

经典保护电路有一个常见的理解误区：

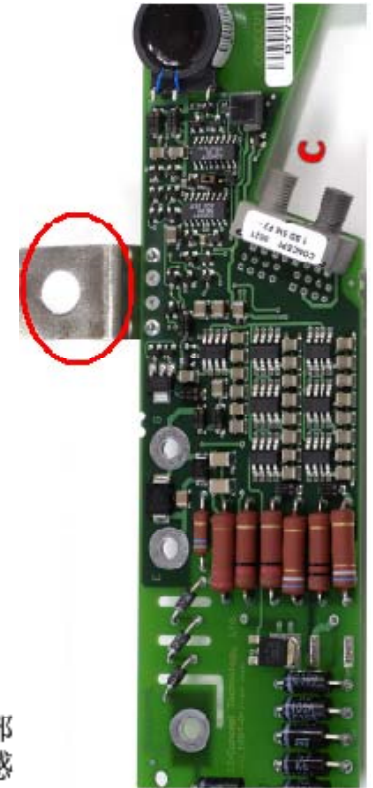
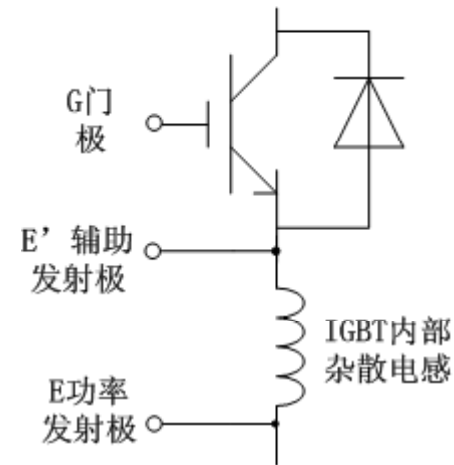
1. 将驱动器的门槛电压调得很低，根据IGBT的外特性，将门槛设在4V，从而认为当电流超过某个值时， $V_{cesat}$ 发生变化，导致驱动器翻转。这样实现过流保护。这种办法的意图是想利用二极管“检测”IGBT的饱和压降，当其超过某个值时将IGBT关断。实际上这种做法很容易导致驱动器误保护。IGBT驱动器的主要目的是抓住IGBT的退饱和现象，从而进行保护，它不能准确检测到IGBT的饱和压降。

## di/dt 保护

有一些IGBT，需要在驱动电路上配备di/dt保护(例如1SD536F2)，这种电路的可以限制IGBT关断时的di/dt，目的是保护IGBT芯片。下面是该电路实现的原理，1SD536F2上的铜片是这个电路的标志。



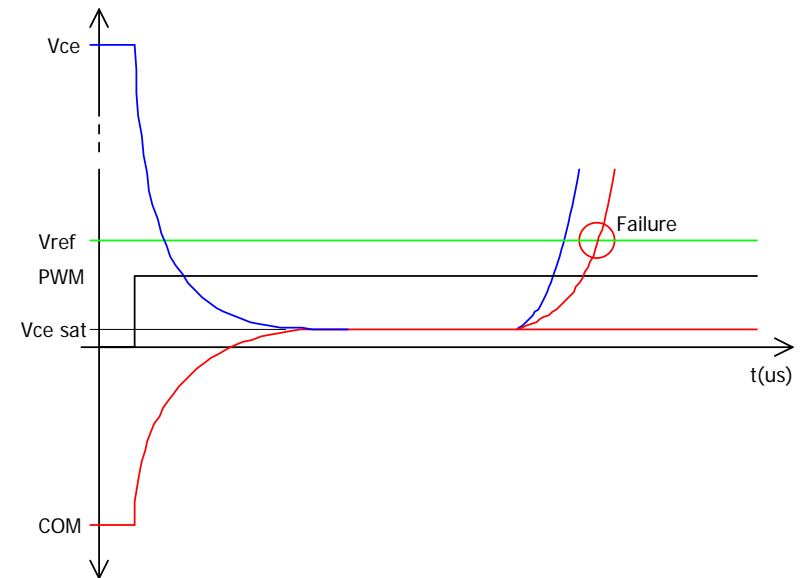
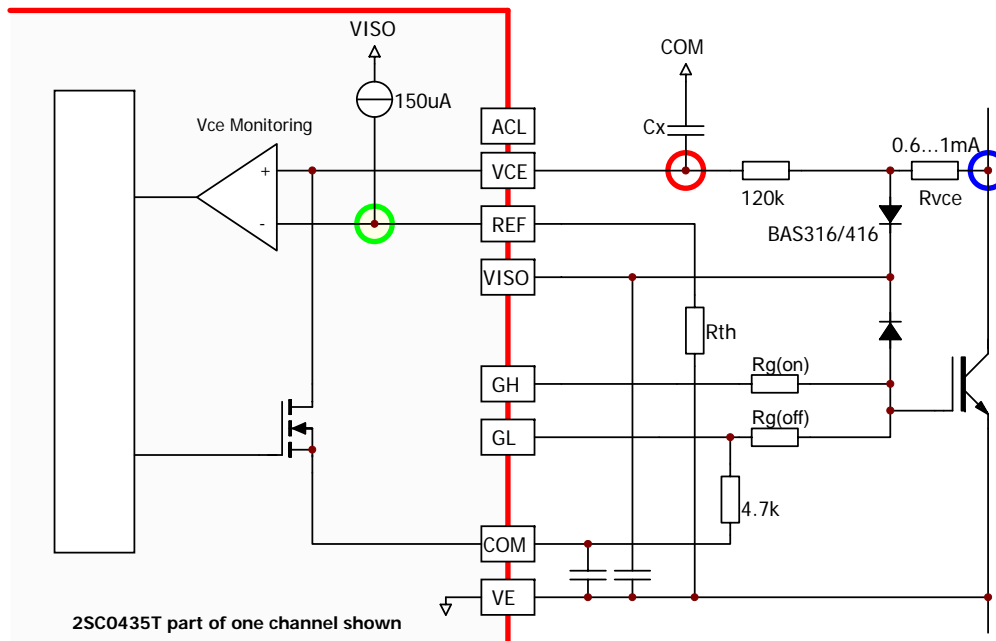
© CT-Concept Technologie AG - Switzerland



## SCALE-2 的短路保护原理

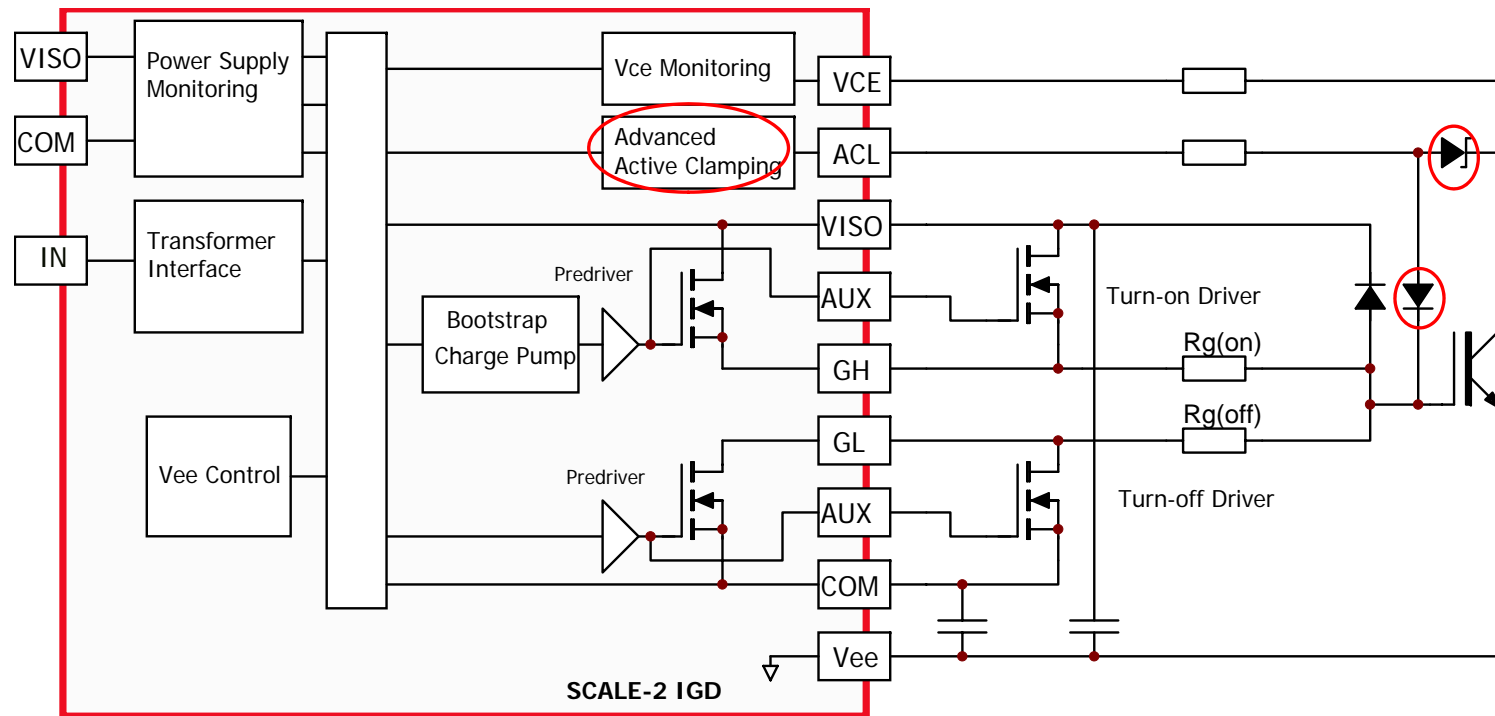
右下图为功能示意图，横轴电压参考点为IGBT的发射极(VE)；

1. 当IGBT关断时，内部mosfet打开，Cx上电压被钳在COM，比较器不翻转；
2. 当IGBT进入导通的过程中，内部mosfet关掉，蓝点电位向红点充电，红点电位最终接近发射极电位；
3. 当IGBT短路时，其退出饱和区，蓝点电位为母线电压，红点被充电，经过定时后比较器翻转；



## SCALE-2 有源钳位电路

下面的框图中有一个管脚为“ACL”，这是为了完成有源钳位功能的管脚。  
SCALE-2产品的有源钳位功能与上一代比增强了很多，关于更细节的内容，  
请参见有源钳位详细介绍的文档。



## SCALE-2 门极钳位电路

下图中的红圈内的二极管的作用是门极钳位，在IGBT短路时，门极电位有可能被抬升，门极钳位电路可以将门极电位钳住，以确保短路电流不会过高。

