

2012-05-21

Rev 01

IGBT短路测试方法的介绍

Winson Wei (魏炜)

CT-Concept Technologie AG - Switzerland

Wei.wei@igbt-driver.com

Mobile: 186-8878-5868

概述

在开发电力电子装置的过程中，我们需要做很多的测试，但是短路测试常常容易被忽略，或者虽然对装置实施了短路测试，但是实际上并不彻底和充分。下面2种情况比较常见：

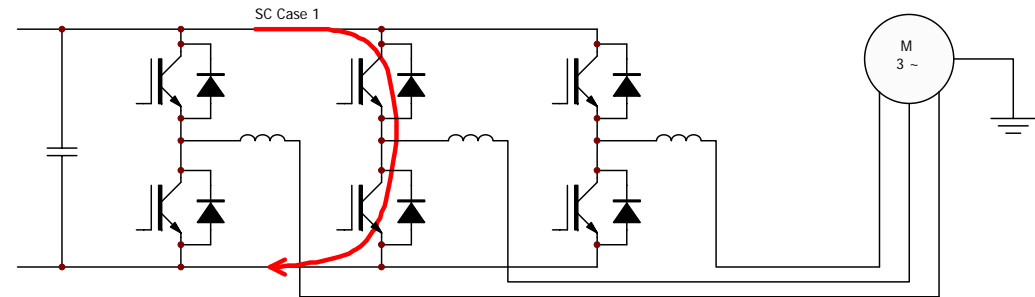
1. 没有实施短路测试，
 - a. 因为觉得这个实验风险太大，容易炸管子，损失太大；
 - b. 觉得短路时电流极大，很恐怖；
2. 实施了短路测试，但测试标准比较简单，对短路行为的细节没有进行观察

本文将详细介绍正确的，完整的短路测试方法，及判断标准。

短路的定义 (1)

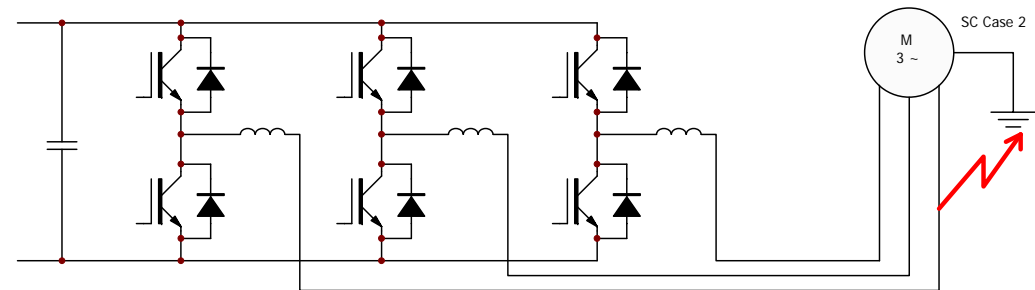
桥臂内短路 (直通)

- 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



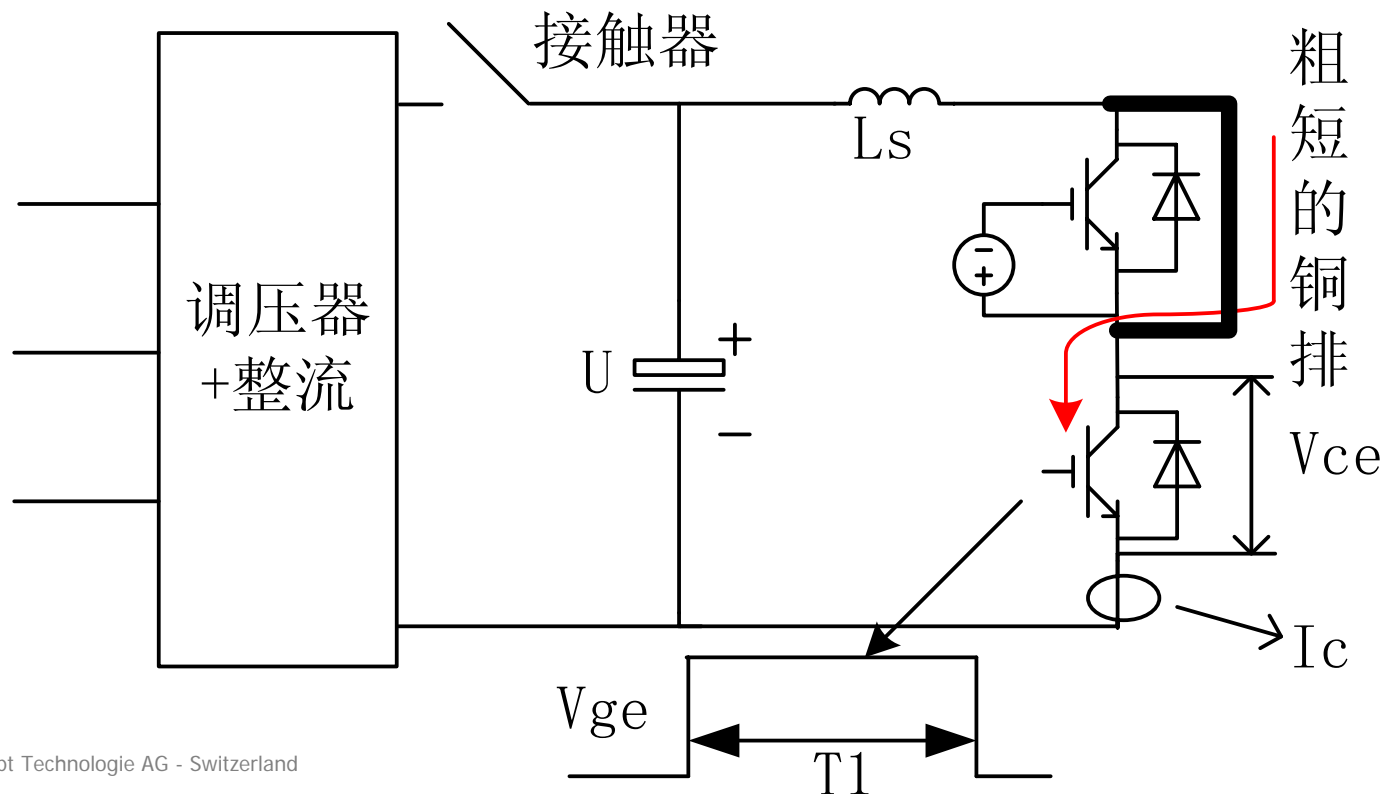
桥臂间短路 (大电感短路)

- 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



一类短路测试的实施方法一

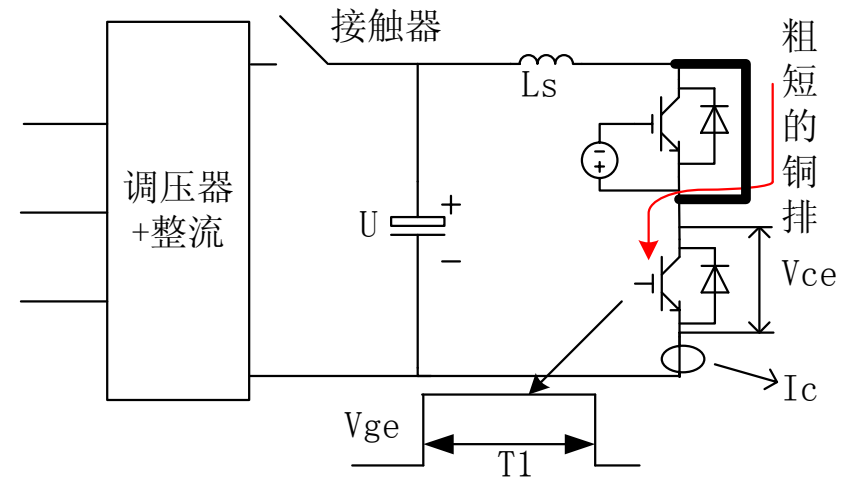
下图为实施一类短路测试时的示意图。电网电压经过调压器，接触器，将母线电容电压充到所需要的值，再断开接触器。上管IGBT的门极被关断，且上用粗短的铜排进行短路。对下管IGBT释放一个单脉冲，直通就形成了。这就是一个典型的一类短路测试。



一类短路测试的实施方法一的注意事项

该测试需要注意的事项:

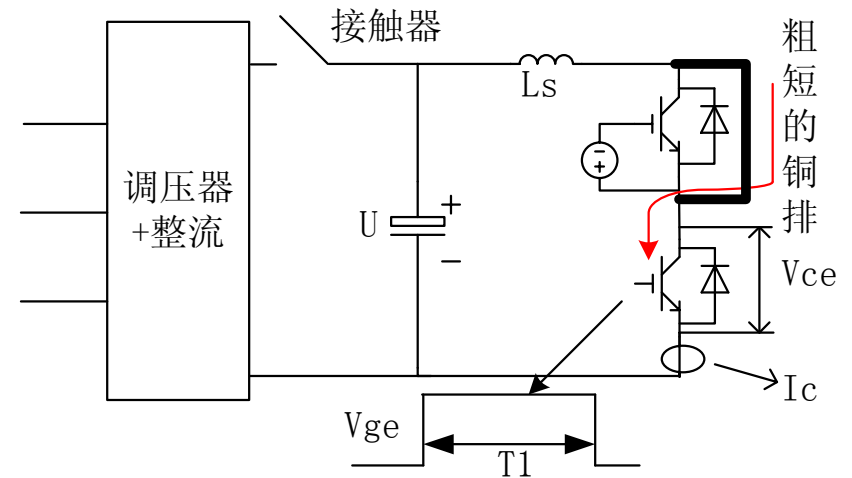
1. 该测试的关注对象是电容组，母排，杂散电感，被测IGBT；
2. 短路回路中的电感量很低，所以上管的短路排的电感量可以极大地影响测量的结果，因此绝不可忽视图所示“粗短铜排”的长短和粗细；
3. 短路测试的能量全部来自母排电容组，通常来说，虽然短路电流很大，但是因为时间极短，所以这个测试所消耗的能量很小，实验前后电容上的电压不会有明显变化；
4. 上管IGBT是被一直关断的，但是这个器件不可或缺，因为下管被关断后，短路电流还需要由上管二极管续流；
5. 该测试需要测量三个物理量，分别是，下管的 V_{ce} ， V_{ge} ，及 I_c ；



一类短路测试的实施方法一的注意事项

该测试需要注意的事项：

6. 电流探头需要测量图中 I_c 的位置，而不是短铜排的电流，这两个位置的电流波形是不同的；
7. 下管IGBT的脉冲需要严格控制，最开始实验可以使用 $10\mu s$ ，然后逐步增加；
8. 环境温度对实验结果有较大的影响，通常datasheet给出的高结温的结果；对应用者而言，常温实验是比较现实的；但低温时的短路测试会比较苛刻，如果系统规格有低温要求时，是有必要进行测试的；
9. 在此实验前需要对直流母排的杂散电感有一定的评估，或者用双脉冲测试方法对IGBT关断时的电压尖峰进行评估，以把握好短路时的电压尖峰，这个值可能会非常高；



实验步骤及方法（1）

1. 在弱电情况下，确认所发单脉冲的宽度；
2. 将母线电压调至20~30V，发送一个单脉冲，此时也会发生短路，会有一些的电流，利用此步骤确认电流探头的方向及其他各物理量测量正确，同时确认示波器能正确捕捉该瞬间；这个步骤会比较安全；
3. 短路测试时，母线不宜过低，否则可能会见到一些奇异的震荡；对于1200V的IGBT，母线为500V起；1700V的IGBT，母线为700V起；3300V的IGBT，1000V起；
4. 母线加到额定点，将进线接触器断开，放出单脉冲，装置会发出“咚”的一声响，确认示波器捕捉到该时刻；
5. 通常来说，如果一切都设置正确的话，短路测试是很容易成功的，但也可能由于某些细节没有处理好，存在一定的几率，该测试会失败——这个IGBT会失效，并将电容的能量全部放掉，一般不会爆炸得很厉害；

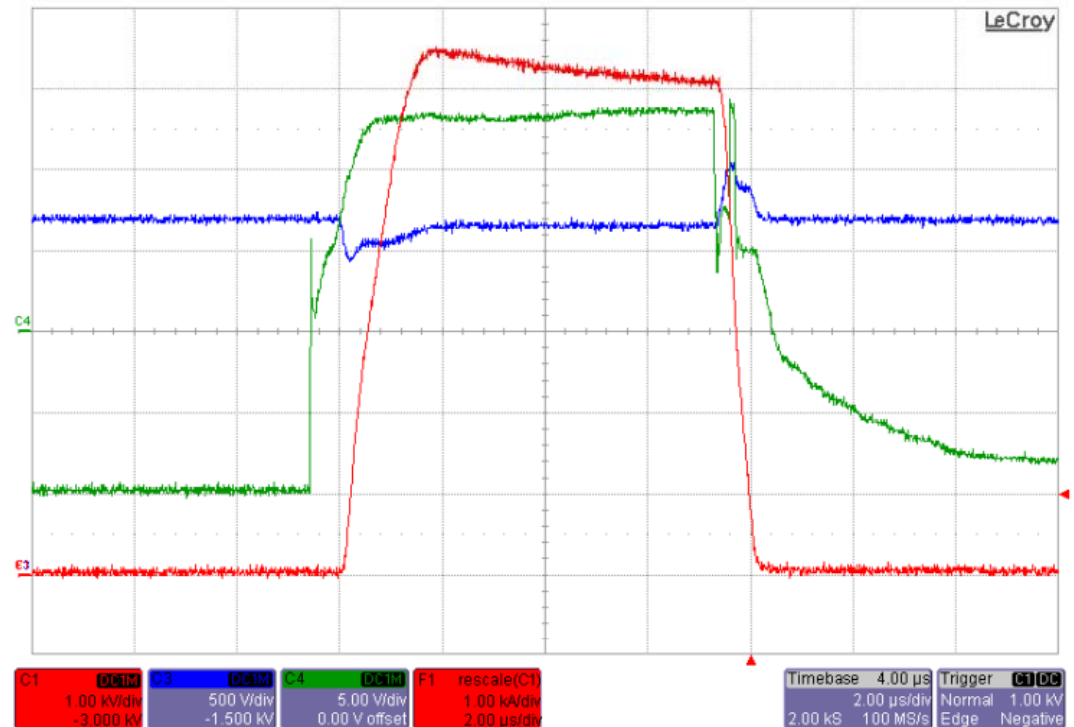
实验步骤及方法（2）

6. 第一次发10us的脉冲实际上是一种尝试性测试，其目的是，在尽量低风险的情况下，对设备的短路性能进行最初步的摸底；
7. 如果第一次10us测试已经发现波形有问题，则需要整改；
8. 如果第一次10us测试发现IGB没有发生退饱和现象，则可能意味着短路回路电感量太大，需要整改；
9. 如果第一次10us测试发现波形正常，可以脉冲延长至12us，再做，再延长到15us，再做，如果发现驱动器释放出来的脉冲不再增长，则意味着驱动器对IGBT进行了保护，否则，意味着驱动器保护电路设置有问题，需要整改；

对结果的评判（1）

右图为某一个测试结果，

1. 用电流的上升率 di/dt 求出短路回路中的全部电感量，再减去之前测出的杂散电感，就能得到插入的铜排的感量；
2. 关注短路电流的最高值，与datasheet中标注的值进行比较，是否过高，电流是否有震荡；
3. 从IGBT退饱和算起，至电流被关断，期间的时间是否控制在 $10\mu s$ 内，这个条件是不可以妥协的；



某品牌1500A/3300V的IGBT的一类短路测试， $V_{dc}=2200V$ ， $T_j=25^\circ C$ ，@CONCEPT瑞士实验室

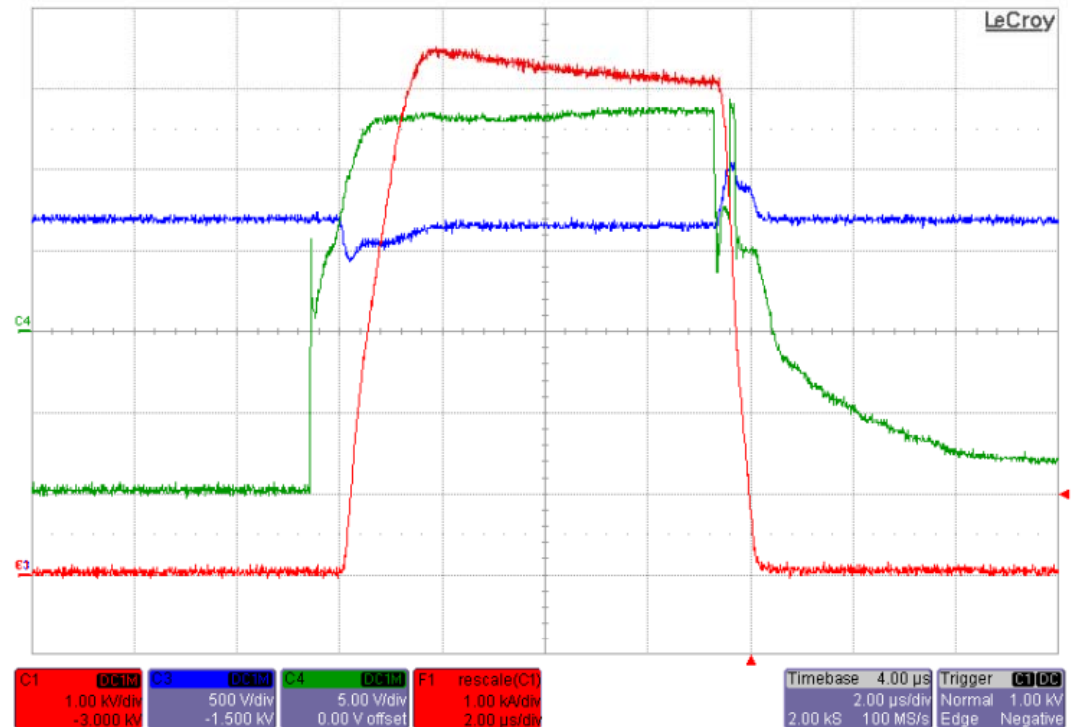
红线: I_c

蓝线: V_{ce}

绿线: V_{ge}

对结果的评判（2）

4. 短路电流的峰值与门极钳位电路有很大的关系，如果门极钳位性能不好，短路电流峰值会很高；
5. 关注Vce电压，需要多久才退饱和，在关断时刻时，Vce电压尖峰有多高，是否存在危险，有源钳位是否动作；
6. 门极电压的评判需要比较谨慎，因为这个测试di/dt及du/dt都很大，门极探头很容易测不准



某品牌1500A/3300V的IGBT的一类短路测试，Vdc=2200V，Tj=25℃，@CONCEPT瑞士实验室

红线: Ic

蓝线: Vce

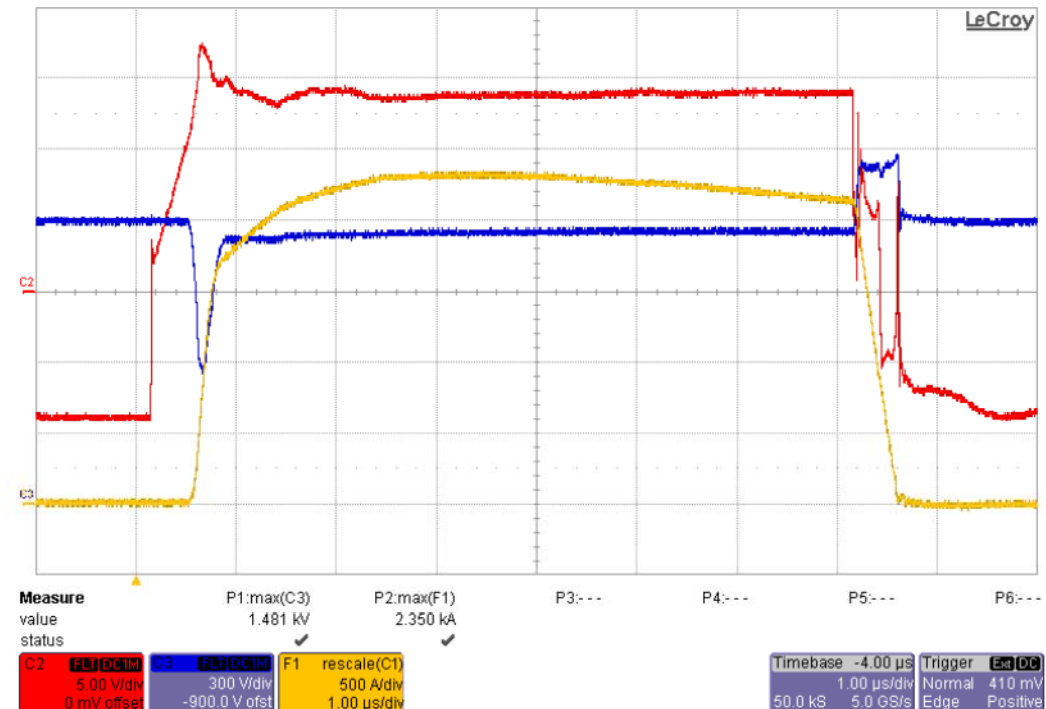
绿线: Vge

另一个IGBT的测试结果

右图是另外一个1700V的IGBT的一类短路测试结果。

这个IGBT的速度比较快，因此Vce开始先下降，然后IGBT才发生退饱和，Vce才上升至直流母线。

不同的品牌，代数，电压等级，电流等级的IGBT，其短路行为会有差别，不过本质是相同的。



某品牌450A/1700V的IGBT的一类短路测试，Vdc=1200V，Tj=25°C，

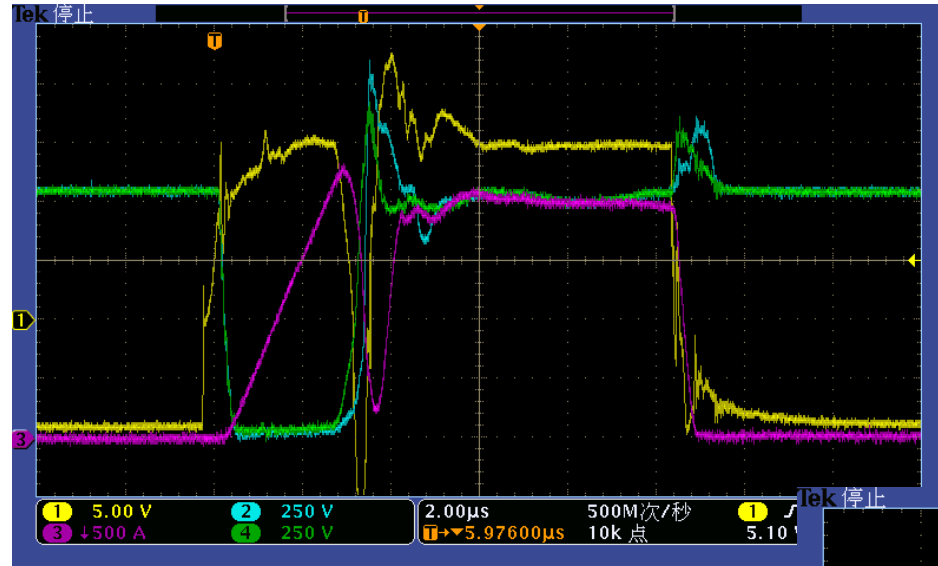
@CONCEPT瑞士实验室

红线: Vge

蓝线: Vce

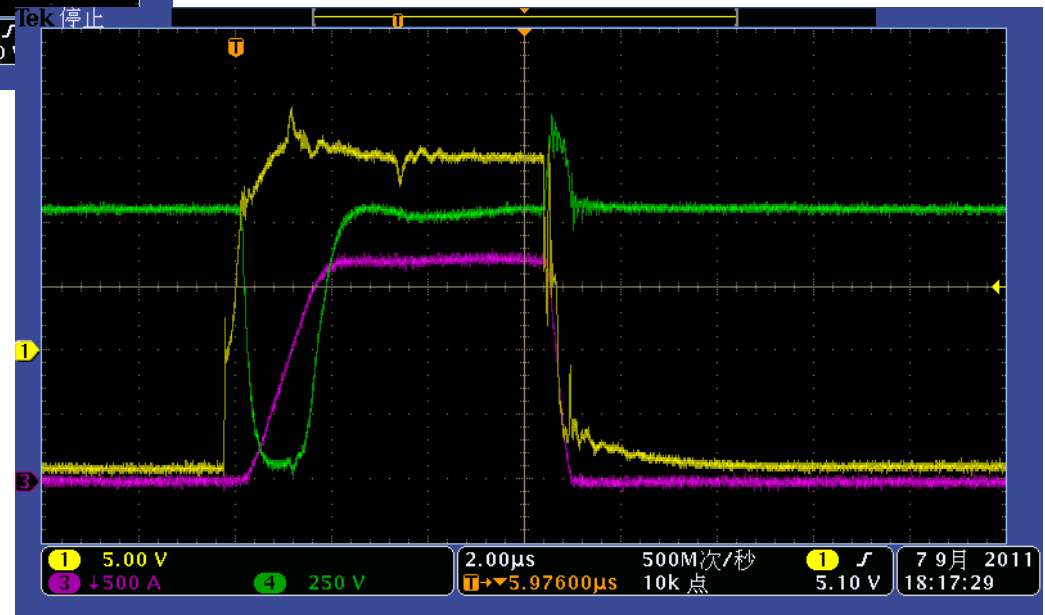
黄线: Ic

存在问题的波形



左图是一个在真实装置开发中有问题的结果，如果不做调整这个IGBT会面临较大风险。

右图是同样的装置经过调整，达到了理想的实验结果。



门极钳位（gate clamping）功能的测试

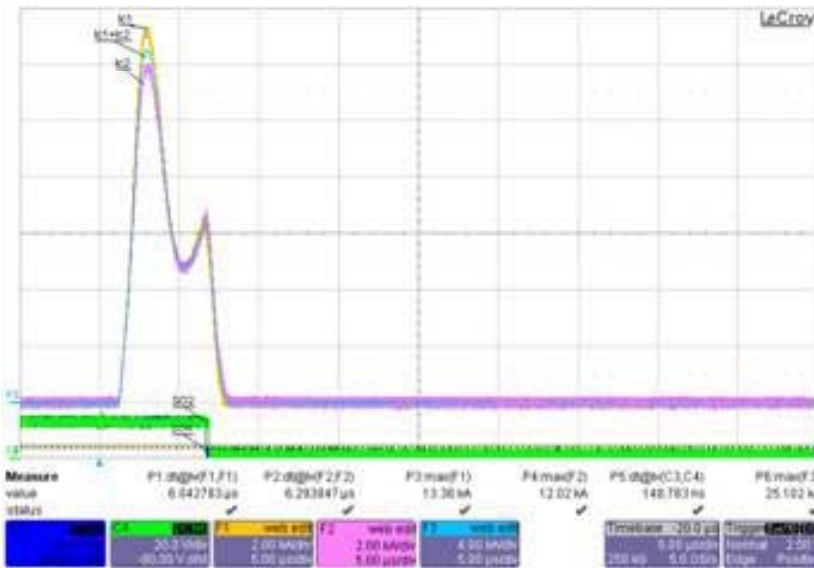
在短路测试中，电流的形状与门极钳位电路的性能密切相关，而门极钳位的功能只有在这个时候才能体现出来。

由于很多人都不太了解IGBT的短路行为，或者是没有深入测试设备的短路性能，因此，导致了对门极钳位电路的不重视。

门极钳位电路出现的原因是IGBT存在米勒电容，在IGBT短路时，米勒电容会影响门极电压，导致短路电流激增，使IGBT承担风险。

越大容量的IGBT，米勒效应越强，门极钳位电路越重要。

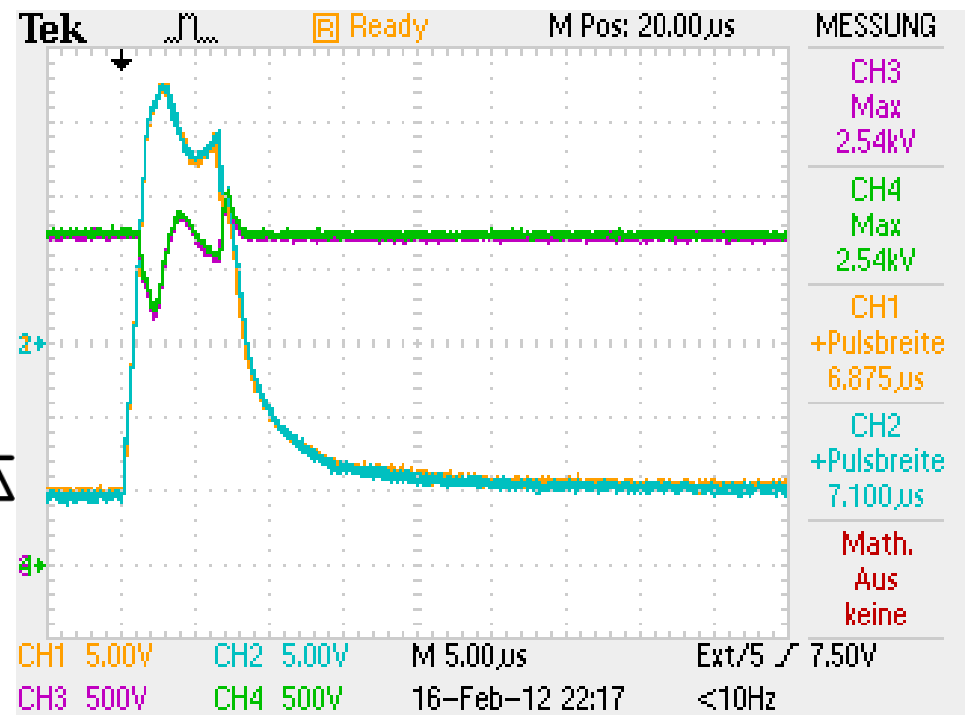
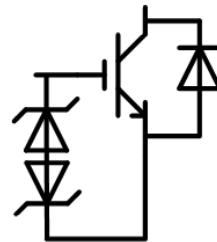
差的门极钳位的结果



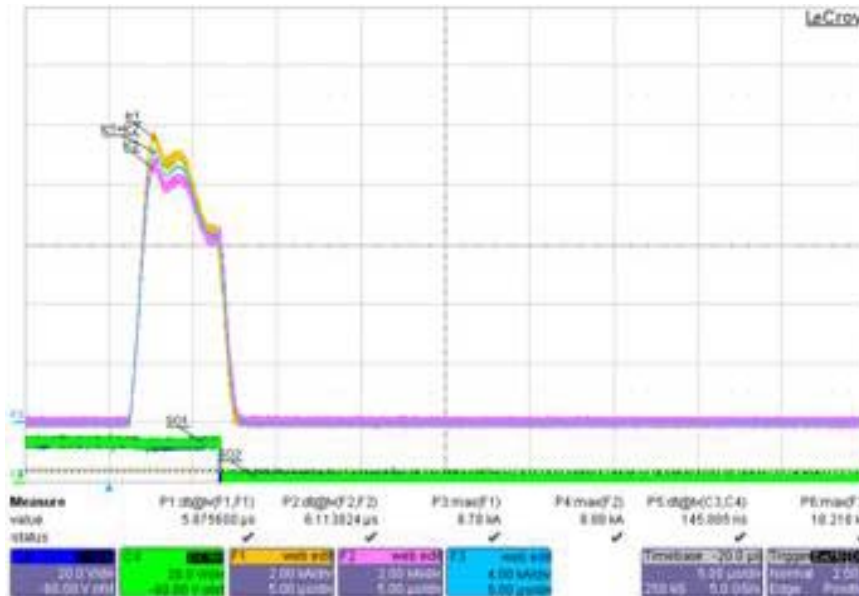
左图及下图为某型号2片1500A/3300V并联的短路测试波形，使用门极和发射极间的TVS进行门极钳位，如下图示。

母线电压为2200V，实验结果显示，IGBT的电流峰值为13.36kA。

CH1,2: V_{ge}
CH3,4: V_{ce}

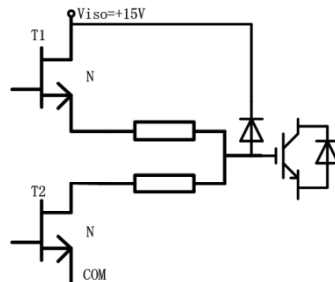


好的门极钳位的结果

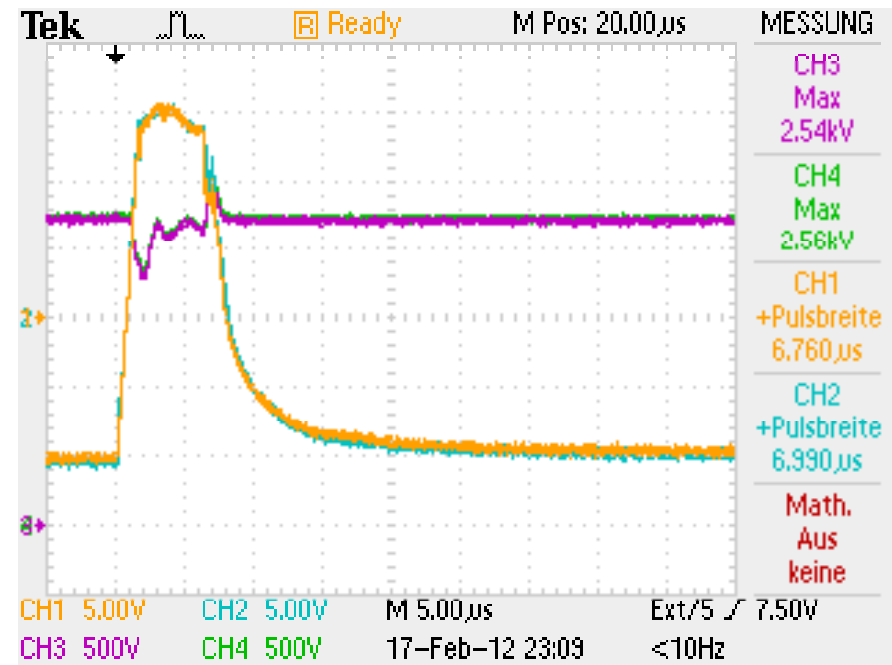


母线电压为2200V，实验结果显示，IGBT的电流峰值为9.78kA。

CH1,2: V_{ge}
CH3,4: V_{ce}

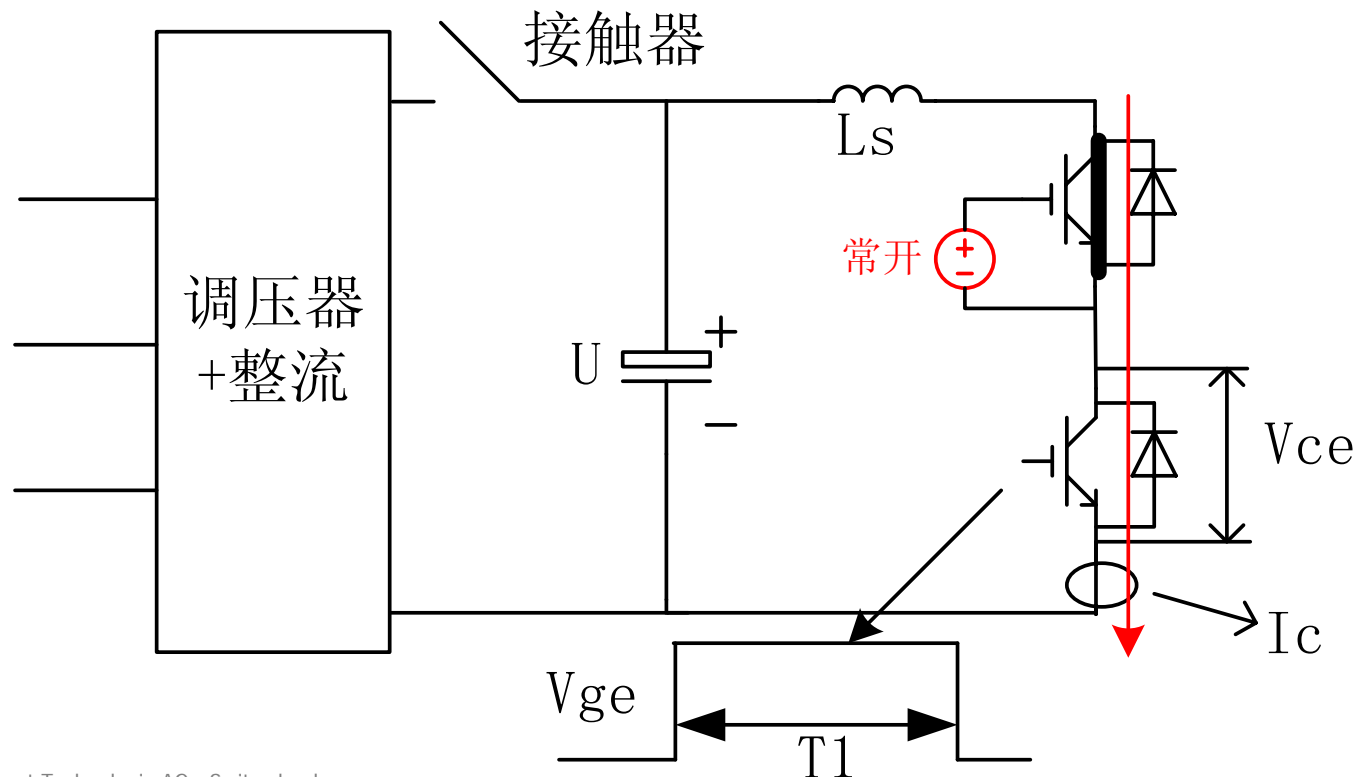


在上页的基础上，完全相同的硬件设置，只是修改了门极钳位电路。用下图所示的门极钳位电路。



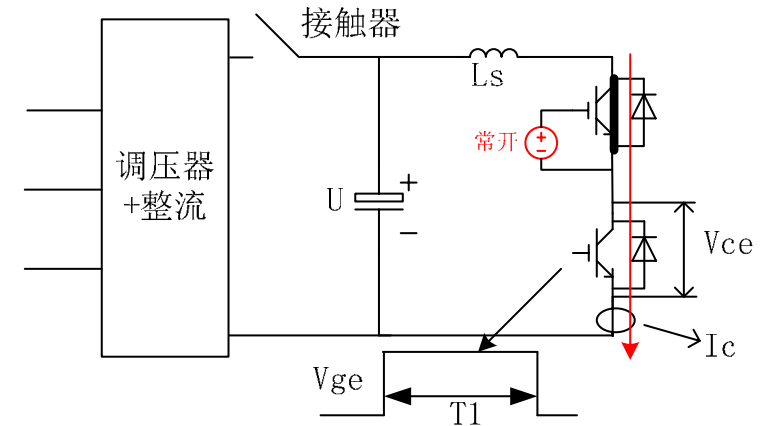
一类短路测试的实施方法二

下图为实施一类短路测试的另外一种方法。给上管IGBT驱动器一个常高信号，使上管保持开通，再给下管发单脉冲。这个实验的优点是，确保短路回路中的电感量就是直流母线的杂散电感，足够低。



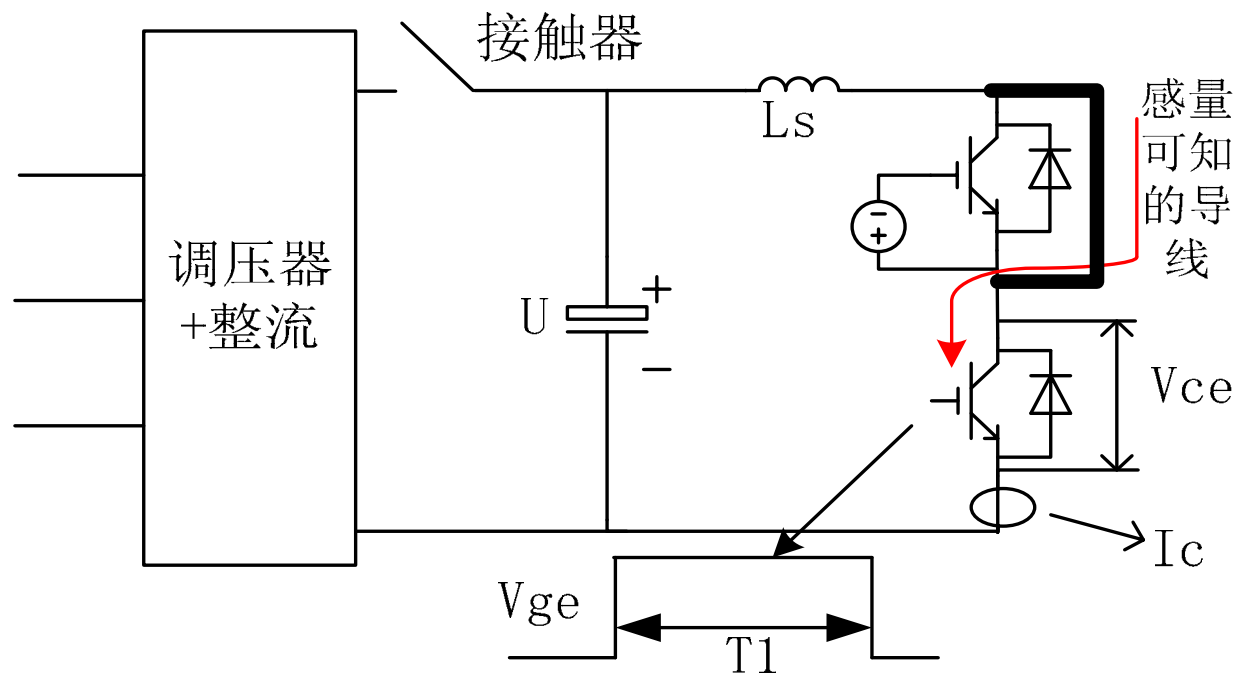
注意事项

1. 在前文介绍的短路测试方法一中，有一个缺点，如果插入的短路电缆没有控制好，感量过大，会导致进入了二类短路；
2. 在并联的情形下做短路测试方法一，如果并联的桥臂中插入的感量不一致，不对称，非常容易导致炸管；
3. 短路测试方法二中，短路回路的电感量非常稳定，就等于电容，母排，IGBT模块的杂散电感之和，短路电流变化率很高，轻易就能达到5000A/us的水平；
4. 在这个实验中，短路脉冲的宽度必须被控制住，从窄至宽慢慢放开；
5. 这个实验中，放出单脉冲的那只IGBT总是会先退出饱和区；



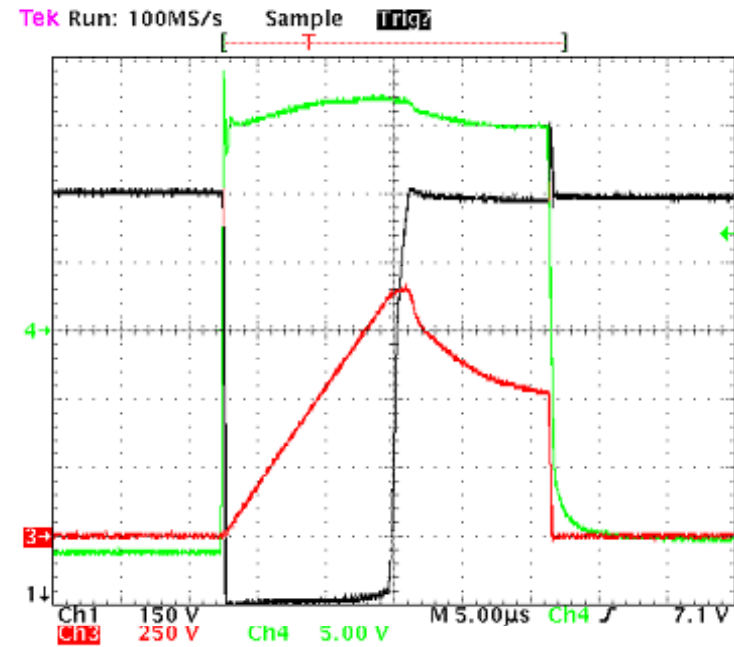
二类短路测试方法

在实际运行的机器中，二类短路是比较容易遇到的短路类型，例如逆变器在拖动电机时，电机定子侧短路，此时就是二类短路。对这种短路的测试方法是在短路回路中插入某一数值的感量，然后观察其短路行为。



波形

右图所示为二类短路的测试波形，IGBT导通后，首先进入饱和导通，然后随着电流的增加，当电流到达IGBT的退饱和点时，IGBT电压迅速上升。这标志着IGBT退出了饱和区。然后驱动器经过定时后，关断IGBT。



过流保护功能的验证

当短路回路中的电感量继续增大时，就会变成过流。过流的特征是：

1. 电流斜率较低，霍尔器件能侦测到；
2. 电流一定会流过桥臂输出端；

因此，霍尔元件就是过流保护电路的关键元器件。关于霍尔的动态性能，有2个参数是最重要的：

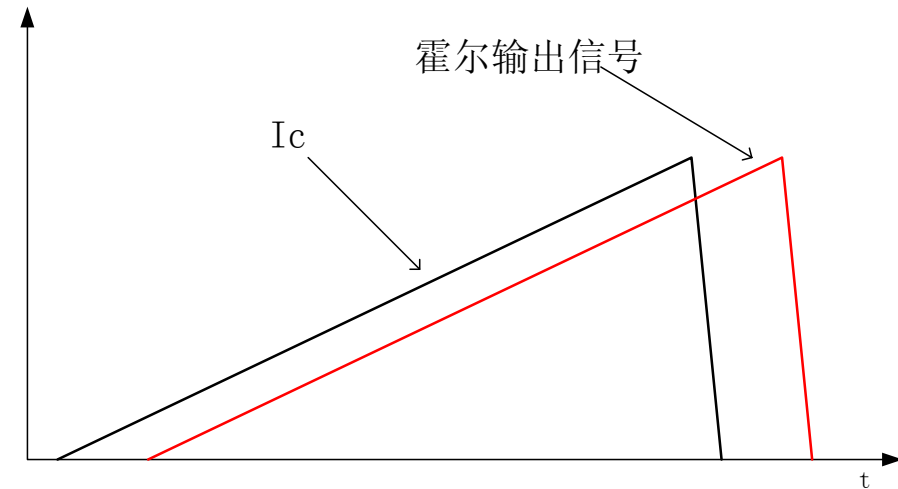
1. di/dt 跟随精度
2. 响应时间

下图摘自某霍尔的datasheet：

t_r	响应时间 ³⁾ @ 90 % of $I_{P\ max}$	< 1	μs
di/dt	di/dt 跟随精度	> 100	A/ μs

霍尔元件的关键性能指标

用双脉冲测试方法，把IGBT的电流测出来并显示在示波器上，并以此为参考。将霍尔的输出信号，经过系统的滤波后，也放在示波器上。观察所检测的信号是否能及时并准确地跟随被测电流。



霍尔的响应时间通常在1us以内，对于过流保护这项功能来说，已经足够快了，只要系统传输这个信号时，不要过分的插入惯性环节，这个响应时间是足够的。

霍尔的电流跟随精度通常能达到50A/us，或者100A/us，这个水平也是很快的了，通常过流现象在时间上并不苛刻，IGBT完全能在几十或者几百us内耐受得住。

电流环的带宽对系统的贡献

在电力电子系统中，控制对象总是某个或者某几个物理量，其中，电流环是最重要的控制环路。

电流环通常是内环，它具有带宽高，速度快，动态响应快的特点。因为电流是由电感量限制的，所以电感量越低，电流的变化速度就越高，电流环如果要把握住这个电流，就需要更高的带宽。

可以这样说，控制系统的电流环带宽越高，系统对电流的把控能力就越强，在遇到过流现象时，系统会越早知道，并做出反应。所以，建议将电流环的带宽做高些，以便系统能更好的把控电流。