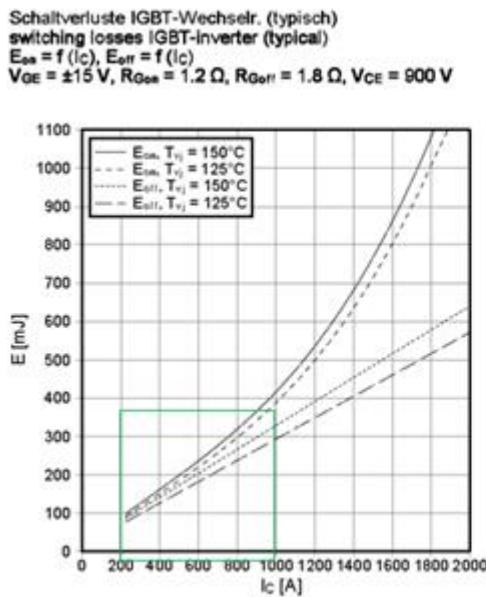


IGBT 是个功率器件，它的开关频率上限并不是一个确定的值。我一般都是这么回答这个问题的：

首先，开关频率是指 IGBT 在一秒钟内开关次数。而在确定的母线电压和导通电流下，IGBT 每次开关都会产生一定的损耗，开通损耗是 E_{on} ，关断损耗是 E_{off} ，还有二极管反向恢复也有损耗 E_{rec} 。

I GBT 的开关频率越高，开关次数就越多，损耗功率就也高，那乘以散热器的热阻后，IGBT 的温升也越高，如果温度高到超出了 IGBT 的上限，那 IGBT 就失效了。具体你们可以看我之前发的关于 IGBT 热设计的文章。

但是损耗是和电压电流成正比的，如下图所示。



Assume: E_{on}/E_{off} is proportional with I_C , and in certain range proportional with V_{CE} ($\pm 20\%$)

$$E_{on} = E_{on_nom} * \frac{I_C}{I_{C_nom}} * \frac{V_{CE}}{V_{CE_test}}$$

$$E_{off} = E_{off_nom} * \frac{I_C}{I_{C_nom}} * \frac{V_{CE}}{V_{CE_test}}$$

IGBT switching loss:

$$P_{sw} = f_{sw} * (E_{on} + E_{off})$$

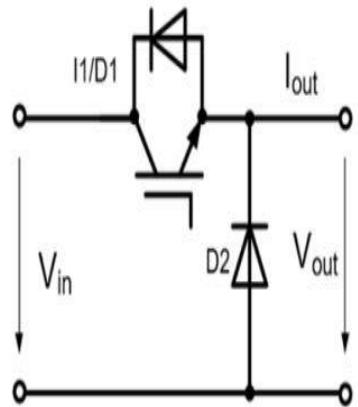
所以假如用一个很大标称电流的 IGBT 工作在一个小的电流下，那这个大 IGBT 的开关损耗功率和导通损耗功率就都会减小，那么这个大 IGBT 就更有可能用在更高的开关频率。

很多新手有个误区，他们原话是这么说的，“小管子发热小，大管子发热大，你看那大 IGBT 模块发热功率都上千瓦，那分离 IGBT 芯片才几瓦。。。”

其实他刚好说反了，在同一个电压等级下同样技术的芯片，标称电流越大的说明导通电阻越小，因此才能通更大的电流啊。

总而言之，IGBT 的开关频率最高到多少，取决于在此工况下 IGBT 的结温会不会超上限。只要你有钱，巴菲特都能陪你吃饭，所以只要不惜成本 3300V 也能工作在 50kHz 硬开关。。。你不信？有图有真相。

Buck Options	Constant Load Current	
Input Voltage	1500	V
Blocking Voltage	3300	V
Output Voltage	800	V
Duty Cycle	0.53	
Switching Frequency	50000	Hz
Output Current	10	A



Modules/Discs

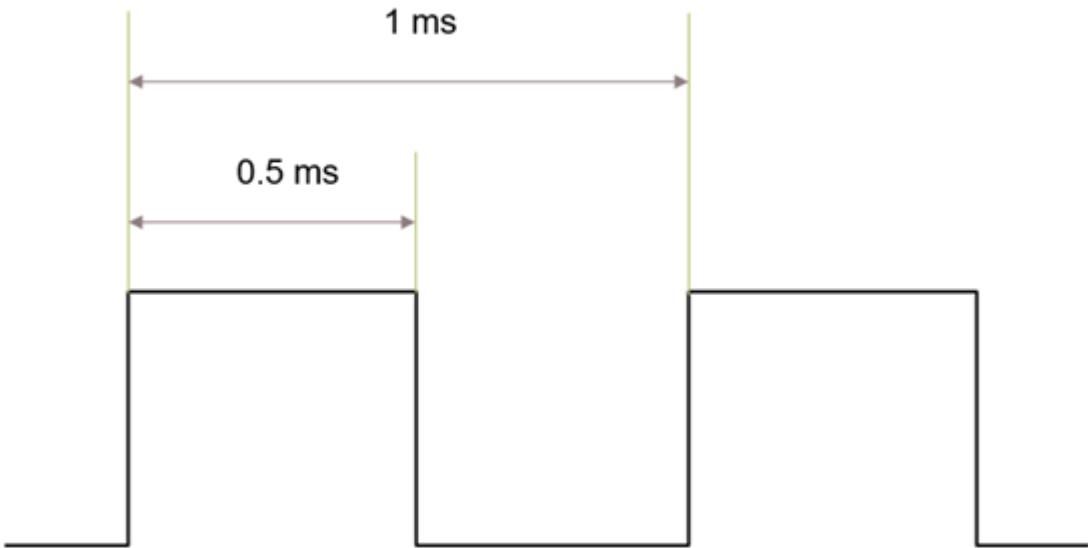
Steady-State Analysis finished: Tue
Sep 10 16:28:52 2019

FZ1500R33HE3	
IGBT Parameters	▼
Diode Parameters	▼
Cooling Condition	▼
Simulation Results	▲
Maximum Junction Temperature	
Switch	137.7 °C
Diode	119.2 °C

顺便介绍个 IPOSIM 的新功能，点击[阅读原文](#)可以直接跳转到 IPOSIM 刚才截图那个工况的仿真结果。

所以说别再问我 IGBT 最高的最高开关频率了，只要你有钱，随便超频。虽然有钱可以为所欲为，但是违反物理极限的事情还是有钱也做不到的。那什么是物理极限呢？那就是 IGBT 的开关速度。

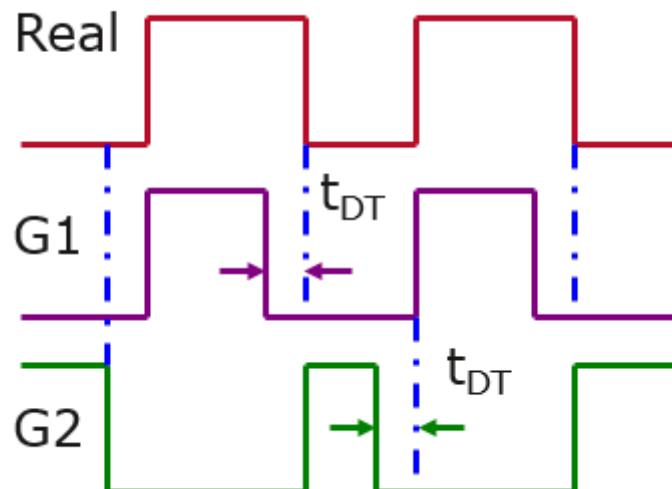
刚才说了开关频率是 IGBT 在一秒内开关的次数，而且 IGBT 每个开关周期里还有占空比，比如说 1kHz 开关频率，50% 占空比，那控制型号发出的方波从开通到关断的时间就是 0.5 毫秒。如下图。



但是你以为你发了 0.5 毫秒的方波，IGBT 就能同步开 0.5 毫秒？不能，IGBT 很迟缓，一般同等技术水平下的 IGBT 芯片，标称电压越高的 IGBT 越迟缓。这个迟缓时间就是开关延迟，定义方法如下图。

一般都是关断延迟比开通延迟长，所以一个半桥上下桥臂的 IGBT 在开关状态切换时，需要一个死区时间，就是上下两个 IGBT 同时处于关断状态。否则就会出现上下桥臂直通短路的情况。

死区时间主要取决于关断延迟比开通延迟长了多少（当然还要有冗余）。



一般常见的 3300V IGBT 的死区时间都在 10us 以上。

以上文中的例子，50kHz 对应一个周期是 20us，假设是半桥 DCDC，占空比 50%，那一次开通时间只有 10us，再减去 10us 死区时间，这个 IGBT 就不用开通了，只能永远保持关断状态。

因此这就是 IGBT 的物理极限，关断延迟和死区时间导致的频率极限。但是这个极限比实际应用的开关频率高出很多，因此平时并没有意义去讨论这个问题，除非你真的要用 3300V 的 IGBT 工作在 50kHz。（在大部分实际应用中 3300V 的 IGBT 开关频率都是 1kHz 左右，超过 2kHz 就非常少见了。）

最后我们在举一个实际中会碰到的有参考价值的例子。

例如高速电机的应用，假设电机额定转速在 10 万转以上，一对极，折算成电机驱动频率约为 2000Hz，逆变器直流母线电压 600V，额定扭矩对应的线电流有效值约为 30A，水冷散热器。

在高速电机应用中，大部分是无刷直流的控制方法，但有写特殊场合为了保证控制精度和扭矩稳定性，需要采用 SVPWM 的控制方法，这时就需要逆变器有很高的开关频率了，而且开关频率越高，纹波越小，电机的扭矩就约平稳，我们假设开关频率要不低于 30kHz。

现在我们开始选型，根据逆变器的体积和成本考虑，我们先初选 FS75R12KT4 和 FS100R12KT4，标称电流分别为 75A 和 100A 的两款三相全桥 IGBT 模块。

这个封装的 IGBT 模块，水冷散热器的典型热阻为 0.072K/W，进口水温 60°C。在散热条件确定后，我们就可以开始仿真计算了。

我们把结温上限设为 145 度，留 5 度的安全余量。

可以得到一个结温在 145 度下，输出电流和开关频率的关系，如下图所示。黑色是 100A 的模块，红色是 75A 模块，在 30~40kHz 的频率区间，100A 的模块能比 75A 的模块多输出约 10A 的电流有效值。在 30A 输出电流下，100A 模块的开关频率可以比 75A 模块高 15kHz 以上。当然你可以选个更大的 FS150R12KT4，工作到 100kHz，不过这时候你就要考虑下 1200V 一般 3us 的死区时间可能会吃掉一半的 PWM 波，所以这时候频率又被开关速度给限制了。

所以回到我们的主题，IGBT 的频率可以有多高？虽然极限取决于死区时间，但是实际中主要还是取决于散热和电流，不提散热和电流张开就问开关频率，这是许多小白司机常犯的错误。