

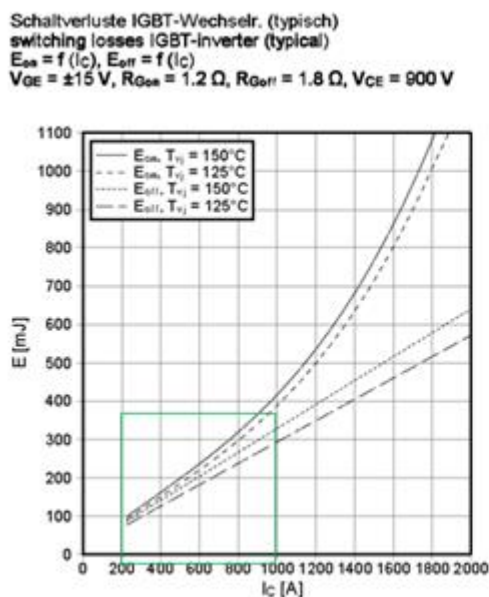
IGBT 是个功率器件，它的开关频率上限并不是一个确定的值。

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 in proportional with I_C , and in certain range in 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:

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

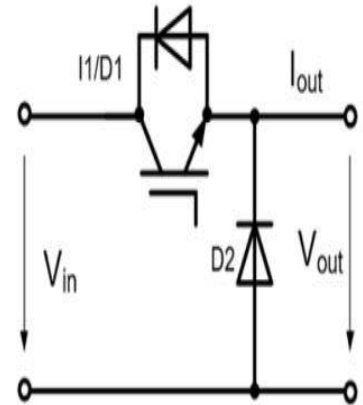
所以假如用一个很大标称电流的 IGBT 工作在一个小的电流下，那这个大 IGBT 的开关损耗功率和导通损耗功率就都会减小，那么这个大 IGBT 就更有可能用在更高的开关频率。

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

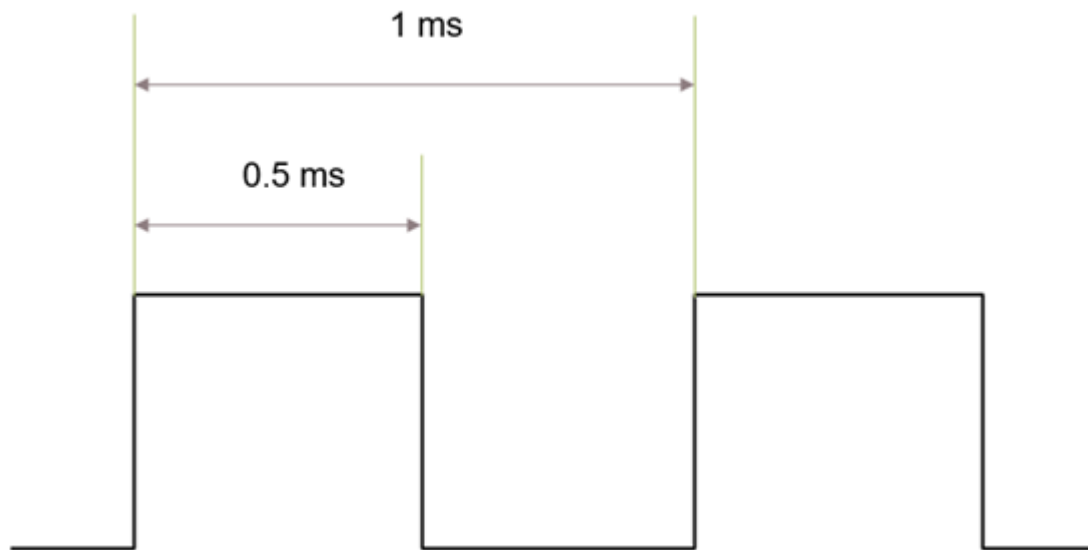
Steady-State Analysis finished: Tue
Sep 10 16:28:52 2019

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。

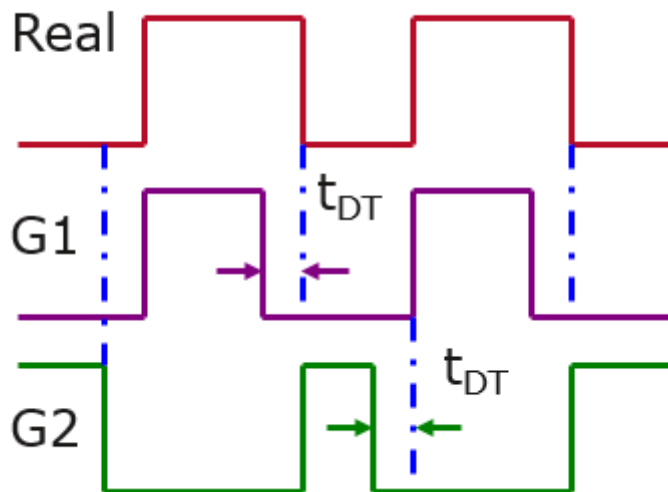
刚才说了开关频率是 IGBT 在一秒内开关的次数, 而且 IGBT 每个开关周期里还有占空比, 比如说 1kHz 开关频率, 50% 占空比, 那控制型号发出的方波从开通到关断的时间就是 0.5 毫秒。如下图。



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 10 μ s 以上。

以上文中的例子，50kHz 对应一个周期是 20 μ s，假设是半桥 DCDC，占空比 50%，那一次开通时间只有 10 μ s，再减去 10 μ s 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 就非常罕见了。）

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。