

IGBT 模块的选择

1. IGBT 模块的功率损耗

IGBT 关断截止时, $I(t) \approx 0$, 损耗的功率可忽略。为了便于分析, 将损耗分为导通损耗和开关损耗。另外, 开关损耗也可分为两类: 具有理想二极管时 IGBT 的开关损耗和考虑二极管反向恢复时间时 IGBT 的开关损耗。

IGBT 导通时, 如果电流为方波脉冲, 那么导通能量就等于电流、电压降和导通时间三者之积。IGBT 在任意电流和温度时的最高电压降, 根据数据表提供的数据, 可按以下两步得到:

首先, 从 IGBT 集电极发射极饱和电压与壳温的关系曲线上找出能满足所需电流的集电极发射极饱和电压。然后, 为了得到最大压降, 在给定结温下从该曲线上得出的电压降必须乘以电气特性表中给出的最大值与典型值之比。

如果栅极驱动电压不是 15V, 最大压降值还需要些修正, 修正系数可参考器件公司的 IGBT 设计手册。如果电流不是方波脉冲, 导通损耗只能用积分计算。这样必须建立电流波形和电压降的数学表达式, 这些函数关系可参考器件公司的 IGBT 设计手册。

在负载为电感的电路中, 开关导通引起续流二极管反向恢复, 同时开关器件中产生很大的电流尖峰, 从而使 IGBT 和续流二极管的开关损耗增加。考虑到二极管反向恢复引起的开关损耗, IGBT 总的开关损耗可由下式给出:

$$E_D = \frac{U_1}{2} \left[\left(1 + \frac{I_r}{I} \right) t_s - \left(1 - \frac{I_r}{I} \times \frac{t_b}{2} \right) \right] \quad (6-1)$$

式中: U_1 和 I 分别为电源电压和负载电流; I_r 为二极管峰值反向恢复电流; t_s 和 t_b 为反向时间 t_n 的两个分量。

功率变换器采用不同功率开关器件时的功率损耗可按下列工程公式计算。

稳定功耗为

$$P_{ss} = I_{CP} U_{CE(sat)} \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sin^2 x \cdot \frac{1 + \sin(x - \theta)}{2} dx = I_{CP} U_{CE(sat)} \left[\left(\frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \right) \cos \theta \right] \quad (6-2)$$

开关功耗为

$$P_{sw} = (E_{SW(on)} + E_{SW(off)}) \cdot F_{sw} \cdot \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sin x dx = (E_{SW(on)} + E_{SW(off)}) \cdot F_{sw} \cdot \frac{1}{\pi} \quad (6-3)$$

总功耗为

$$P_o = P_{ss} + P_{sw}$$

式中: $E_{sw(on)}$ 为每一个脉冲对应的 IGBT 开通能量 (在 $t_j = 125^\circ\text{C}$ 、峰值电流 I_{cp} 条件下); $E_{sw(off)}$ 为每个脉冲对应的 IGBT 关断能量 (在 $t_j = 125^\circ\text{C}$ 、峰值电流 I_{cp} 条件下); P_{sw} 为变频电源每臂的 PWM 开关功率; I_{cp} 为正弦输出电流的峰

值； $U_{ce(sat)}$ 为 IGBT 的饱和电压降(在 $T_j=125^{\circ}\text{C}$ 、峰值电流 I_{cp} 条件下)； F_{sw} 为开关频率； D 为 PWM 信号占空比； θ 为输出电压与电流之间的相位角（功率因数为 $\cos\theta$ ）。

2. IGBT 模块参数的选择

IGBT 已广泛应用于 20KHz 的硬开关变换器及频率更高的软开关变换器中。通常情况下，选择 IGBT 模块的参数时应考虑以下几个方面的因素。

(1)功率开关器件额定值（额定电压和额定电流）

根据功率开关器件生产厂家提供的资料（比如日本三菱公司的应用手册），正确选用 IGBT 有两个关键的因素：一是功率开关器件关断时，在任何被要求的过载条件下，集电极峰值电流必须处于开关安全工作区的规定之内（即小于两倍的额定电流）；二是 IGBT 工作时的内部结点温度必须始终保持在 150°C 以下，在任何情况下，包括负载过载时，都必须如此。在使用 IGBT 模块的场合，选择何种电压、电流规格的 IGBT 模块，需要依据变换器的电路拓扑和负载特性等参数。

1) 电压规格。IGBT 模块的电压规格与所用于电路的输入电源电压紧密相关，其相互关系见表 6-1。

| 表 6-1 IGBT 模块的电压规格与输入电压关系 | | | |
|---------------------------|---------------------|-------------------------------|-------|
| 功率器件电压规格 | 600V | 1200V | 1400V |
| 电源电压 | 200V、220V、230V、240V | 346V、350V、380V、400V、415V、440V | 575V |

2) 电流规格。IGBT 模块的集电极电流增大时， U_{ce} 上升，所产生的额定损耗亦变大。同时，开关损耗增大，元件发热加剧。因此，根据额定损耗，控制开关损耗所产生的热量在器件结温 (T_j) 允许值以下（通常为安全起见，以 125°C 以下为宜），特别是用于高频开关时，由于开关损耗增大，发热也加剧，要将集电极电流的最大值控制在直流额定电流以下使用，从经济角度考虑这是值得推荐的。

(2)功率开关器件的安全工作区(SOA)

设计中很重要的一点是防止 IGBT 因过电压或过电流而引起损坏或工作不稳定。例如，在用于电机控制和作为变压器负载的变频电源或斩波器中，IGBT 必须工作在其规范的开通过程和通态工作点额定值的正向偏置安全工作区(FBSOA)，规范其关断过程和断态工作点额定值的反向偏置安全工作区(RBSOA)和规范其短路容量的短路安全工作区(SCSOA)内。

(3)各种降额因素的考虑

功率器件的基本失效率取决于工作应力（包括电、温度、振动、冲击、频率、

速度、碰撞等)。除个别低应力失效的功率器件外,其他均表现为工作应力越高、失效率越高的特性。为了使功率器件的失效率降低,在电路设计时要进行降额设计,其降额程度除考虑可靠性外还需考虑体积、重量、成本等因素。对于不同的功率器件,降额标准亦不同。实践表明,大部分功率器件的基本失效率取决于电应力和温度,因而降额也主要是控制这两种应力,功率

②电流规格。IGBT 模块的集电极电流增大时, U_{ce} 上升, 所产生的额定损耗亦变大。同时, 开关损耗增大, 元件发热加剧。因此, 根据额定损耗, 控制开关损耗所产生的热量在器件结温 (正) 允许值以下 f 通常为安全起见, 以 125°C 以下为宜), 特别是用于高频开关时, 由于开关损耗增大, 发热也加剧, 开关管电压降额系数在 0.6 以下, 电流降额系数在 0.5 以下。由于功率开关器件的实际工作条件同手册中给出的指标的测试条件是不同的, 因此, 实际使用中功率开关器件能达到的指标同手册中给出的指标相比都会有差别, 实际使用中这些指标都会下降。引起功率开关器件降额的最主要因素是温度, 而降额最明显的指标是功率开关器件的电流容量。半导体工作在较高的温度条件下会变成导体, 从而失去电压阻断能力, 因此, 功率开关器件工作中管芯的温度 (结温) 不能超过允许值。这一上限值同管芯材料和工艺有关。功率开关器件使用手册中给出的电流容量通常是在壳温为 25°C 、结温为上限的条件下测得的数据, 而实际使用时壳温往往要高得多, 结温又必须与上限值保持一定的裕量, 因此, 允许的结温、壳温差要小得多, 从而使功率开关器件实际允许的耗散功率大打折扣。由于耗散功率同流过器件的电流密切相关, 因此器件实际允许的电流容量也就下降了。

在实际设计中, 应该计算出功率开关器件工作时的电压和电流峰值, 并根据安全工作区 (SOA) 来初步选择器件的电压和电流容量, 然后估算功率开关器件的发热功率和最高环境温度下功率开关器件工作时的壳温, 再根据壳温来决定降额量。由于降额, 可能需要将最初选定的功率开关器件的容量放大, 才能最终决定功率开关器件的参数。考虑到工作时电压、电流的冲击, 功率开关器件的参数选择应留有充足的裕量。另外, 还要考虑 IGBT 生产厂家有关的生产规格。软开关变换器中功率开关器件的选择包括以下两个部分。

1) 软开关变换器中三相逆变桥电路的主开关功率器件 $S_1 \sim S_6$ 。相对于传统的硬开关技术变换器来说, 零电压过渡软开关技术变换器中主功率开关器件工作过程中的最大改变就是在零电压条件下开通。由于硬开关技术变频电源中也有吸收电路存在, 所以, 主功率开关器件的关断过程两者是一样的。另外, 主功率开关器件的稳态损耗两者也是一样的。主功率开关器件的选择参考了硬开关技术变换

器的选择原则，例如：根据日本三菱公司的使用手册，50kVA (37kW)变频电源的电流有效值为 75A，峰值电流为 106A。考虑到 1.4 倍的降额因数，留够 2 倍的工作裕量，故选定主功率开关器件 S1 ~S6 的额定参数为 1200V、300A。

2) 辅助谐振回路中的辅助功率开关器件 Sr1~Sr6。辅助开关的工作时间可以控制得很短，所以，对其功率要求比较小，但通过其中的峰值电流并不小，还要高于主开关功率开关器件 S1~S6。对于 IGBT 来说，无论峰值电流通过的时间长短，其额定电流的选择一定要保证为通过它的峰值电流的 1.5~2.0 倍。但是，在这里可以充分利用 IGBT 的安全工作区，在安全工作区内 IGBT 可以承受至少两倍的额定电流值，且不会对 IGBT 有任何的损坏。辅助开关中通过的最大电流 i_{srm} 可以表示为：

$$i_{srm} = I_x + i_{rm} = \sqrt{3}I_m + \frac{E}{\sqrt{L_r/C_r}} \quad (6-5)$$

式中： I_x 为预置电流； I_m 为相电流最大值； $i_{rm} = \frac{E}{\sqrt{L_r/C_r}}$ 。

在一个主开关的开关周期内，辅助开关中通过的平均电流 i_{sr} 为

$$i_{sr} = I_x T_{sr} / (2T_s) \quad (6-6)$$

式中： T_{sr} 为辅助谐振回路的谐振周期； T_s 为主开关器件的开关周期。

通过有关参数的设计和选择，可以使得辅助开关中通过的平均电流满足

$$i_{sr} = I_m \times 5\% \quad (6-7)$$

根据变换器的容量选择吸收（谐振）电容及谐振电感，可以得出 I_x 约为 180A， i_{rm} 约为

80A，则辅助开关中通过的最大电流 i_{srm} 约为 260A，所以，辅助开关 Sr1~Sr6 的额定参数可以为 1200V、300A。

3. IGBT 的安全工作条件

1) 驱动电路：由于 IGBT 的 $U_{ce(sat)}$ 和短路耐量之间的折衷关系，建议将栅极电压选为 $+U_G = 15V \pm 10\%$ ， $-U_G = 5 - 10V$ 。栅极电阻与 IGBT 的开通和关断特性密切相关， R_G 小时开关损耗减少，开关时间缩短，关断脉冲电压增大。应根据浪涌电压和开关损耗的最佳折衷关系(与频率有关)选择合适的 R_G 值，一般选为 $10 \sim 27$ 欧。为防止栅极开路，在栅极与发射极间并联 $20 \sim 30K$ 欧的电阻。

2) 保护电路：IGBT 模块使用在高频时，布线电感容易产生尖峰电压，必须注意布线电感和组件的配置。应设的保护项目有：过电流保护、过电压保护、栅极过压及欠压保护、安全工作区、过热保护。

3) 吸收电路：由于 IGBT 开关速度快，容易产生浪涌电压，所以必须设有浪涌钳位电路。

4) IGBT 并联使用时应考虑栅极电路的线路布线、电流不平衡和器件之间的温度不平衡等问题。

4. IGBT 模块及快恢复二极管模块的选用

在选用 IGBT 模块前，应详细阅读模块参数表，了解模块的各项技术指标；根据模块的各项技术参数确定使用方案，计算通态损耗和开关损耗，选择相匹配的散热器及驱动电路。应用中不能超过数据表中所列的最大额定值，工作频率愈高，工作电流愈小；基于可靠性的原因，必须考虑安全系数。不同厂家生产的模块由于其设计和工艺的不同，其产品的技术指标会有很大的差别，因此，在选用时需要特别注意以下几点。

(1) 绝缘材料的选取

由于不同绝缘材料的热导率有很大的差别，其价格也相差很大，因此，导致不同厂家生产的同一外形结构的模块，其实际允许通过的电流容量存在很大的差异。

(2) 芯片的选取

为了保证模块达到额定电流的容量，首先要保证芯片的通态压降；其次要保证芯片的电流密度，即芯片的直径。芯片密封在外壳内，直径是无法看到的，只有通过测试通态压降等参数才能了解芯片的性能。

(3) 焊接 IGBT 模块的焊接孔洞

影响焊接模块质量的主要因素是模块的焊接质量，特别是焊接孔洞和虚焊的发生将严重影响产品的导热和导电性能。其产生的主要原因是焊接过程中助焊剂产生的气泡没有排出去，残留在焊接面内，形成孔洞；或者在焊接前对焊接面的清洗不净，导致虚焊等。

(4) 模块基板的形状与接触热阻

模块的热量要通过基板传导出，因此，模块基板与散热器接触的好坏，即模块基板与散热器的接触热阻直接影响模块的散热效果。若模块焊接的工艺不合理，基板通常会产生中间向下凹的现象，因此，当将模块固定在散热器上时，模块的中间部分不能与散热器很好地接触，使散热器不能充分发挥作用，导致模块无法通过额定电流，通过很小的电流就会烧毁。

(5) 模块的电流容量

由于模块是单面散热，若模块的电流容量做得过大，其消耗的功率必将增大，当模块的电流容量达到一定的数值时，要求模块与散热器之间的热阻非常小，这是采用常规的散热方法所无法达到的。特别是对于大电流模块，用于散热的基板

面积很大，要保证模块基板的整个平面与散热器具有良好的接触，单靠模块的几个紧固螺栓是很难达到的。若接触不良或局部接触不上，模块与散热器的接触热阻将增加几倍或几十倍以上，模块的电流容量将大大下降。所以，某些模块虽然标称几千安的电流容量，而在实际应用中很难达到其标称额定电流容量，因此，模块并不是电流越大越好。