

IGBT 的保护设计

绝缘栅双极型晶体管 IGBT 是由 MOSFET 和双极型晶体管复合而成的一种器件,其输入极为 MOSFET,输出极为 PNP 晶体管,因此,可以把其看作是 MOS 输入的达林顿管。它融和了这两种器件的优点,既具有 MOSFET 器件驱动简单和快速的优点,又具有双极型器件容量大的优点,因而,在现代电力电子技术中得到了越来越广泛的应用。

在中大功率的开关电源装置中,IGBT 由于其控制驱动电路简单、工作频率较高、容量较大的特点,已逐步取代晶闸管或 GTO。但是在开关电源装置中,由于它工作在高频与高电压、大电流的条件下,使得它容易损坏,另外,电源作为系统的前级,由于受电网波动、雷击等原因的影响使得它所承受的应力更大,故 IGBT 的可靠性直接关系到电源的可靠性。因而,在选择 IGBT 时除了要作降额考虑外,对 IGBT 的保护设计也是电源设计时需要重点考虑的一个环节。

1 IGBT 的工作原理

IGBT 的等效电路如图 1 所示。由图 1 可知,若在 IGBT 的栅极和发射极之间加上驱动正电压,则 MOSFET 导通,这样 PNP 晶体管的集电极与基极之间成低阻状态而使得晶体管导通;若 IGBT 的栅极和发射极之间电压为 0V,则 MOSFET 截止,切断 PNP 晶体管基极电流的供给,使得晶体管截止。

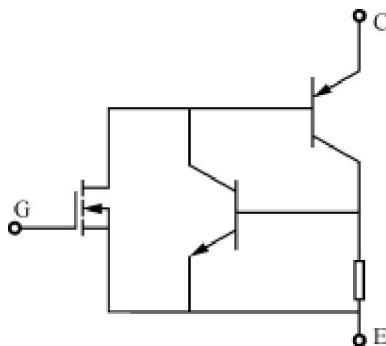


图 1 IGBT 的等效电路

由此可知,IGBT 的安全可靠与否主要由以下因素决定:

- IGBT 栅极与发射极之间的电压;
- IGBT 集电极与发射极之间的电压;
- 流过 IGBT 集电极—发射极的电流;
- IGBT 的结温。

如果 IGBT 栅极与发射极之间的电压,即驱动电压过低,则 IGBT 不能稳定正常地工作,如果过高超过栅极—发射极之间的耐压则 IGBT 可能永久性损坏;同样,如果加在 IGBT 集电极与发射极允许的电压超过集电极—发射极之间的耐压,流过 IGBT 集电极—发射极的电流超过集电极—发射极允许的最大电流,IGBT 的结温超过其结温的允许值,IGBT 都可能会永久性损坏。

2 保护措施

在进行电路设计时,应针对影响 IGBT 可靠性的因素,有的放矢地采取相应的保护措施。

2.1 IGBT 栅极的保护

IGBT 的栅极—发射极驱动电压 V_{GE} 的保证值为 $\pm 20V$ ，如果在它的栅极与发射极之间加上超出保证值的电压，则可能会损坏 IGBT，因此，在 IGBT 的驱动电路中应当设置栅压限幅电路。另外，若 IGBT 的栅极与发射极间开路，而在其集电极与发射极之间加上电压，则随着集电极电位的变化，由于栅极与集电极和发射极之间寄生电容的存在，使得栅极电位升高，集电极—发射极有电流流过。这时若集电极和发射极间处于高压状态时，可能会使 IGBT 发热甚至损坏。如果设备在运输或振动过程中使得栅极回路断开，在不被察觉的情况下给主电路加上电压，则 IGBT 就可能会损坏。为防止此类情况发生，应在 IGBT 的栅极与发射极间并接一只几十 $k\Omega$ 的电阻，此电阻应尽量靠近栅极与发射极。如图 2 所示。

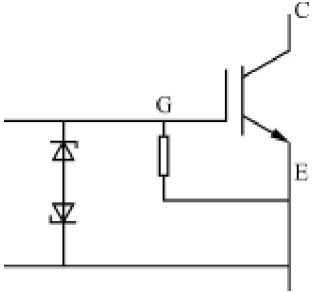


图 2 栅极保护电路

由于 IGBT 是功率 MOSFET 和 PNP 双极晶体管的复合体，特别是其栅极为 MOS 结构，因此除了上述应有的保护之外，就像其他 MOS 结构器件一样，IGBT 对于静电压也是十分敏感的，故而对 IGBT 进行装配焊接作业时也必须注意以下事项：

- 在需要用手接触 IGBT 前，应先将人体上的静电放电后再进行操作，并尽量不要接触模块的驱动端子部分，必须接触时要保证此时人体上所带的静电已全部放掉；
- 在焊接作业时，为了防止静电可能损坏 IGBT，焊机一定要可靠地接地。

2. 2 集电极与发射极间的过压保护

过电压的产生主要有两种情况，一种是施加到 IGBT 集电极—发射极间的直流电压过高，另一种为集电极—发射极上的浪涌电压过高。

2.2.1 直流过电压

直流过压产生的原因是由于输入交流电源或 IGBT 的前一级输入发生异常所致。解决的办法是在选取 IGBT 时，进行降额设计；另外，可在检测出这一过压时分断 IGBT 的输入，保证 IGBT 的安全。

2.2.2 浪涌电压的保护

因为电路中分布电感的存在，加之 IGBT 的开关速度较高，当 IGBT 关断时及与之并接的反向恢复二极管逆向恢复时，就会产生很大的浪涌电压 Ldi/dt ，威胁 IGBT 的安全。

通常 IGBT 的浪涌电压波形如图 3 所示。

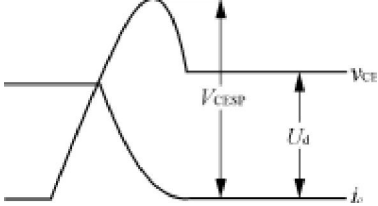


图 3 IGBT 的浪涌电压波形

图中： v_{CE} 为 IGBT 集电极—发射极间的电压波形；

i_c 为 IGBT 的集电极电流；

U_d 为输入 IGBT 的直流电压；

$V_{CESP}=U_d+Ldi_c/dt$,为浪涌电压峰值。

如果 V_{CESP} 超出 IGBT 的集电极—发射极间耐压值 V_{CES} , 就可能损坏 IGBT。解决的办法主要有:

- 在选取 IGBT 时考虑设计裕量;
- 在电路设计时调整 IGBT 驱动电路的 R_g , 使 di/dt 尽可能小;
- 尽量将电解电容靠近 IGBT 安装, 以减小分布电感;
- 根据情况加装缓冲保护电路, 旁路高频浪涌电压。

由于缓冲保护电路对 IGBT 的安全工作起着很重要的作用, 在此将缓冲保护电路的类型和特点作一介绍。

——**C 缓冲电路** 如图 4(a)所示, 采用薄膜电容, 靠近 IGBT 安装, 其特点是电路简单, 其缺点是由分布电感及缓冲电容构成 LC 谐振电路, 易产生电压振荡, 而且 IGBT 开通时集电极电流较大。

——**RC 缓冲电路** 如图 4(b)所示, 其特点是适合于斩波电路, 但在使用大容量 IGBT 时, 必须使缓冲电阻值增大, 否则, 开通时集电极电流过大, 使 IGBT 功能受到一定限制。

——**RCD 缓冲电路** 如图 4(c)所示, 与 RC 缓冲电路相比其特点是, 增加了缓冲二极管从而使缓冲电阻增大, 避开了开通时 IGBT 功能受阻的问题。

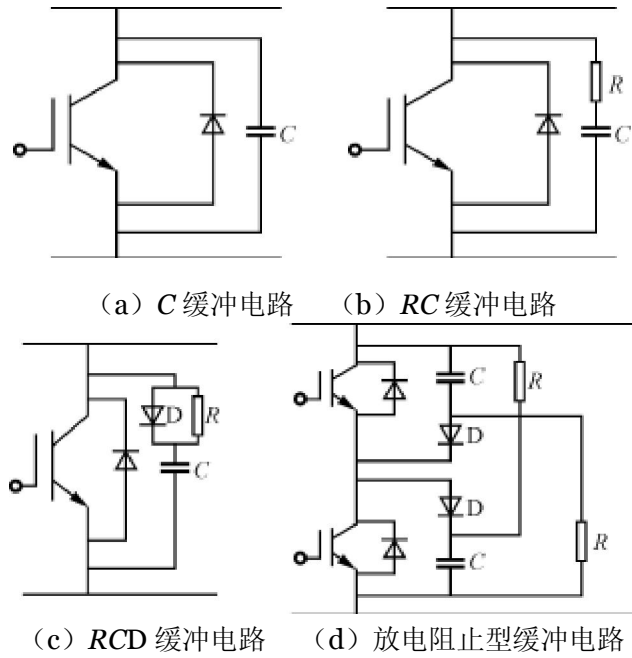


图 4 缓冲保护电路

该缓冲电路中缓冲电阻产生的损耗为

$$P=\frac{1}{2}LI^2f+\frac{1}{2}CU_d^2f$$

- 式中: L 为主电路中的分布电感;
 I 为 IGBT 关断时的集电极电流;
 f 为 IGBT 的开关频率;
 C 为缓冲电容;
 U_d 为直流电压值。

——**放电阻止型缓冲电路**如图 4(d)所示, 与 RCD 缓冲电路相比其特点是, 产生的损耗小, 适合于高频开关。

在该缓冲电路中缓冲电阻上产生的损耗为

$$P=\frac{1}{2}LI^2f$$

根据实际情况选取适当的缓冲保护电路，抑制关断浪涌电压。在进行装配时，要尽量降低主电路和缓冲电路的分布电感，接线越短越粗越好。

2.3 集电极电流过流保护

对 IGBT 的过流保护，主要有 3 种方法。

2.3.1 用电阻或电流互感器检测过流进行保护

如图 5（a）及图 5（b）所示，可以用电阻或电流互感器与 IGBT 串联，检测流过 IGBT 集电极的电流。当有过流情况发生时，控制执行机构断开 IGBT 的输入，达到保护 IGBT 的目的。

2.3.2 由 IGBT 的 $V_{CE(sat)}$ 检测过流进行保护

如图 5（c）所示，因 $V_{CE(sat)}=I_cR_{CE(sat)}$ ，当 I_c 增大时， $V_{CE(sat)}$ 也随之增大，若栅极电压为高电平，而 V_{CE} 为高，则此时就有过流情况发生，此时与门输出高电平，将过流信号输出，控制执行机构断开 IGBT 的输入，保护 IGBT。

2.3.3 检测负载电流进行保护

此方法与图 5（a）中的检测方法基本相同，但图 5（a）属直接法，此属间接法，如图 5（d）所示。若负载短路或负载电流加大时，也可能使前级的 IGBT 的集电极电流增大，导致 IGBT 损坏。由负载处（或 IGBT 的后一级电路）检测到异常后，控制执行机构切断 IGBT 的输入，达到保护的目的。

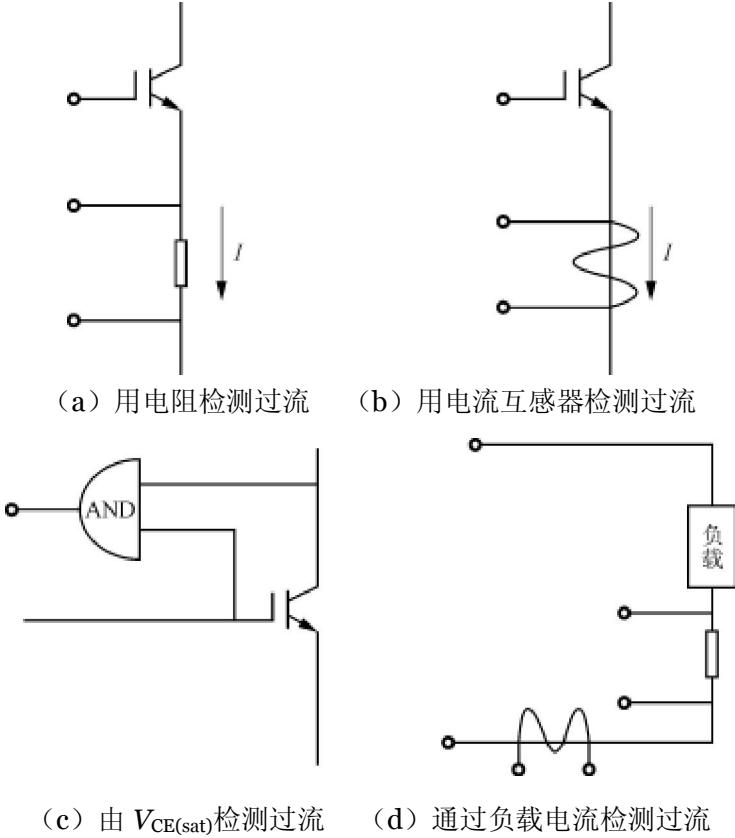


图 5 集电极过流保护电路

2.4 过热保护

一般情况下流过 IGBT 的电流较大, 开关频率较高, 故而器件的损耗也比较大, 如果热量不能及时散掉, 使得器件的结温 T_j 超过 T_{jmax} , 则 IGBT 可能损坏。

IGBT 的功耗包括稳态功耗和动态功耗, 其动态功耗又包括开通功耗和关断功耗。在进行热设计时, 不仅要保证其在正常工作时能够充分散热, 而且还要保证其在发生短时过载时, IGBT 的结温也不超过 T_{jmax} 。

当然, 受设备的体积和重量等的限制以及性价比的考虑, 散热系统也不可能无限制地扩大。可在靠近 IGBT 处加装一温度继电器等, 检测 IGBT 的工作温度。控制执行机构在发生异常时切断 IGBT 的输入, 保护其安全。

除此之外, 将 IGBT 往散热器上安装固定时应注意以下事项:

——由于热阻随 IGBT 安装位置的不同而不同, 因此, 若在散热器上仅安装一个 IGBT 时, 应将其安装在正中间, 以便使得热阻最小; 当要安装几个 IGBT 时, 应根据每个 IGBT 的发热情况留出相应的空间;

——使用带纹路的散热器时, 应将 IGBT 较宽的方向顺着散热器的纹路, 以减少散热器的变形;

——散热器的安装表面光洁度应 $\leq 10\mu m$, 如果散热器的表面不平, 将大大增加散热器与器件的接触热阻, 甚至在 IGBT 的管芯和管壳之间的衬底上产生很大的张力, 损坏 IGBT 的绝缘层;

——为了减少接触热阻, 最好在散热器与 IGBT 模块间涂抹导热硅脂。

3 结语

在应用 IGBT 时应根据实际情况, 采取相应的保护措施。只要在过压、过流、过热等几个方面都采取有效的保护措施后, 在实际应用中均能够取得良好的效果, 保证 IGBT 安全可靠地工作。