

---

# 第 5 章

## 保护电路设计方法

---

### 目 录

1. 短路（过电流）保护 .....	5-2
2. 过电压保护.....	5-6

本章中对 IGBT 的保护电路设计方法进行说明。

---

## 1 短路（过电流）保护

### 1.1 关于短路耐受能力

一旦发生短路，IGBT 的集电极电流增加到超过既定值，则 C-E 间的电压急剧增加。根据这种特性，可以将短路时的集电极电流控制在一定的数值以下，但是在 IGBT 上仍然有外加的高电压、大电流的大负荷，必须在尽量短的时间内解除这种负荷。同时，根据 IGBT 的短路耐受能力，从发生短路起到电流切断为止的容许时间也受到限制。

短路耐受能力如图 5-1 所表示，由短路电流开始流动到引起破坏为止的时间决定，U 系列产品的情况如下所述。

$$\text{短路耐受能力} \cong 10\mu\text{s min}$$

#### < 条件 >

- $V_{CC}$  600V 系列:  $E_d (V_{CC}) = 400V$ 、1200V 系列:  $E_d (V_{CC}) = 800V$
- $V_{GE}$  15V
- $R_G$ : 标准值  $R_G$
- $T_j = 125^\circ\text{C}$

一般情况下，电源电压  $E_d$  越高，温度  $T_j$  越高，短路耐受能力就越小。

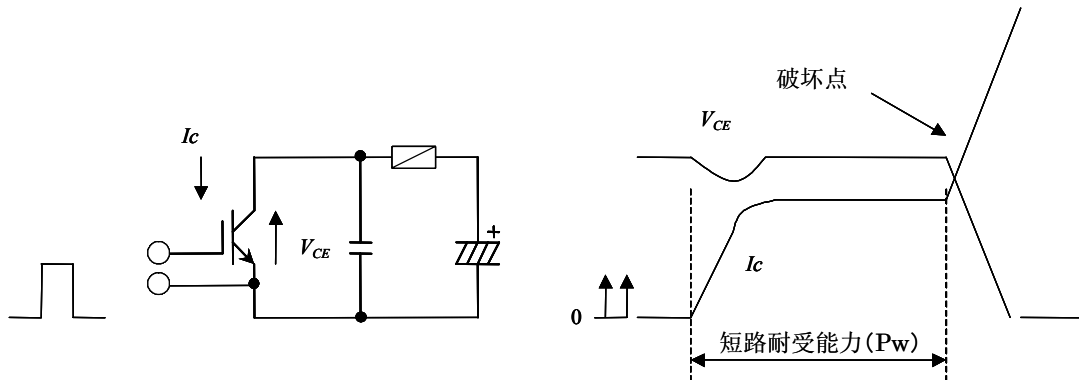
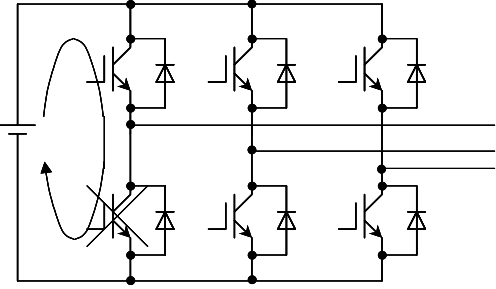
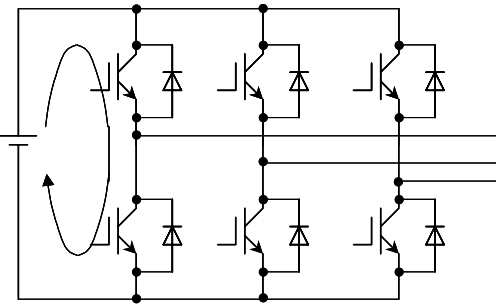
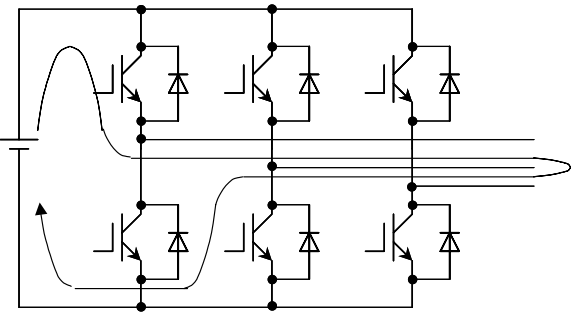
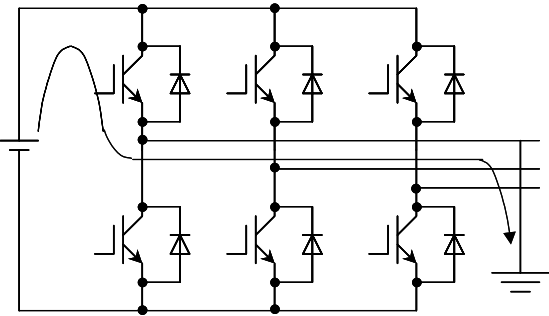


图 5-1 测定电路及波形

1.2 短路模式及发生原因

关于变频装置中的短路模式和发生原因用表 5-1 表示。

表 5-1 短路模式及发生原因

短 路 路 径	原 因
<p>支路短路</p> 	<p>晶体管或二极管破坏</p>
<p>串联支路短路</p> 	<p>控制电路、驱动电路的故障或由于杂波产生的误动作</p>
<p>输出短路</p> 	<p>配线工作等人为的失误以及负荷绝缘的破坏</p>
<p>接 地</p> 	<p>配线工作等人为的失误以及负荷绝缘的破坏</p>

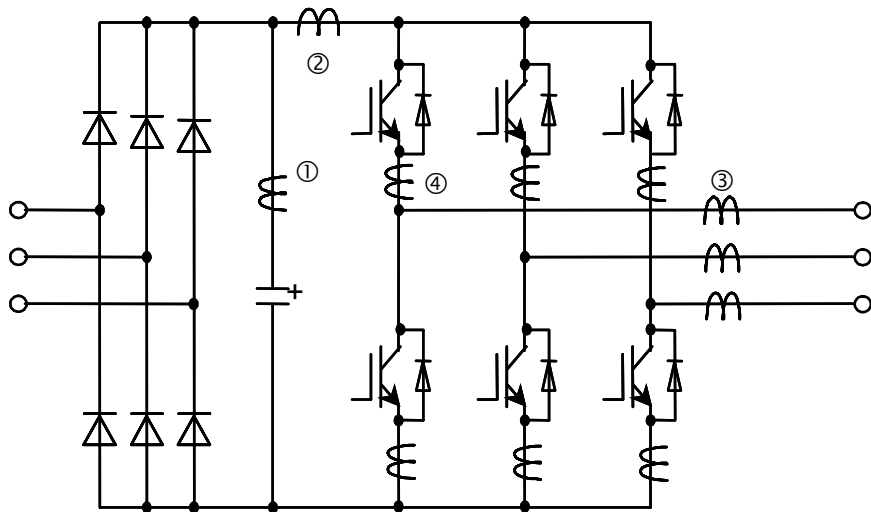
### 1.3 接地（过电流）的检测方法

#### 1) 通过过电流检测器检测

如前所述，由于需要对 IGBT 进行短时间内的保护，因此请将检测出过电流到完成关断为止各电路的动作延迟时间设计为最小。

另外，由于 IGBT 的关断时间极短，如果用通常的驱动信号来切断过电流，则集电极的电压上跳变大，IGBT 有可能被过电压破坏（RBSOA 破坏）。因此，建议在切断过电流时，使 IGBT 轻柔地关断（柔性关断）。

图 5-2 表示了过电流检出器的插入方法，表 5-2 对各种方法对应的特征和可以检测出的内容进行了说明。请考虑您需要如何保护电路，选择确切的方法。



检测器的插入位置	检测内容
①、②、④	<ul style="list-style-type: none"> <li>支路短路</li> <li>输出短路</li> <li>接地</li> </ul>
③	<ul style="list-style-type: none"> <li>输出短路</li> <li>接地</li> </ul>

图 5-2 过电流检测器的插入方法

表 5-2 过电流检测器的插入位置与检测内容

检测器的插入位置	特征	检测内容
与平滑电容器串联插入 (图 5-2 / ①)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 可以使用 AC 用 CT</li> <li>• 检测精度低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 支路短路</li> <li>• 串联支路短路</li> <li>• 输出短路</li> <li>• 接地</li> </ul>
变频器的输入端插入 (图 5-2 / ②)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 需要使用 DC 用 CT</li> <li>• 检测精度低</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 支路短路</li> <li>• 串联支路短路</li> <li>• 输出短路</li> <li>• 接地</li> </ul>
变频器的输出端插入 (图 5-2 / ③)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高频输出装置上可以使用 AC 用 CT</li> <li>• 检测精度高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 输出短路</li> <li>• 接地</li> </ul>
与各元件串联插入 (图 5-2 / ④)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 需要使用 DC 用 CT</li> <li>• 检测精度高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 支路短路</li> <li>• 串联支路短路</li> <li>• 输出短路</li> <li>• 接地</li> </ul>

## 2) 通过 $V_{CE}$ (sat) 检测

该方法能够对表 5-1 中表示的全部短路事故进行保护，由于从检测到过电流到进行保护为止都在驱动电路侧进行，能够做到最高速的保护动作。图 5-3 表示了以  $V_{CE}$  (sat) 检测的短路保护电路实例。

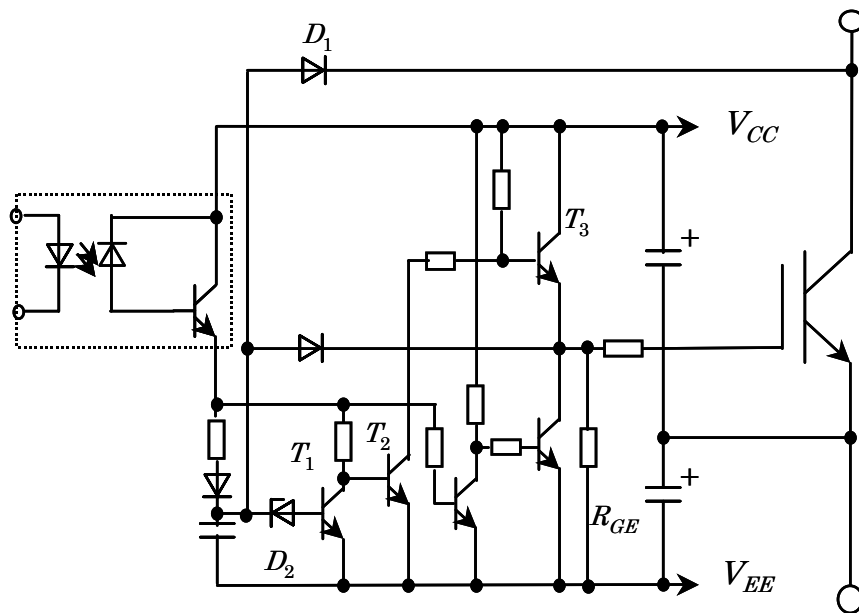
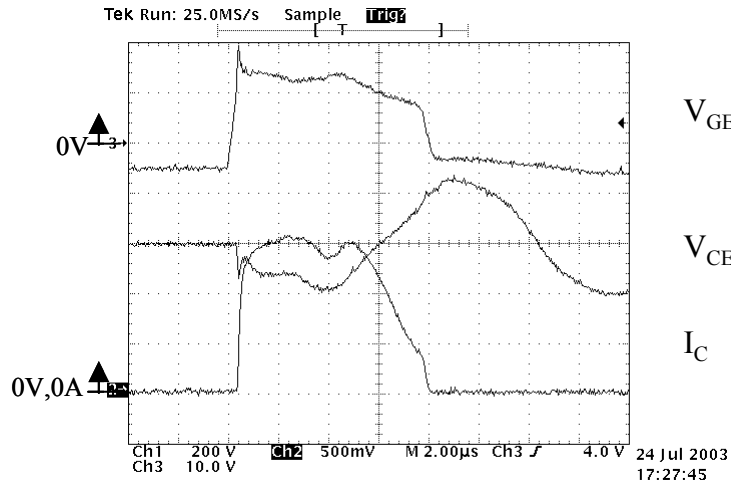


图 5-3 以  $V_{CE}$  (sat) 检测的短路保护电路实例

该电路通过  $D_1$  对 IGBT 的集电极-发射极间电压进行常时监视，当导通的时段中 IGBT 的集电极-发射极间的电压超出  $D_2$  设定的电压时即作为短路状态被检测出来，则形成  $T_1$  开通、 $T_2$  关断、 $T_3$  关断的局面。此时，门极存储的电荷通过  $R_{GE}$  缓慢放电，从而抑制了 IGBT 关断时产生过大的尖峰电压。

本公司的 IGBT 驱动用混合式 IC (型号 EXB840、841) 内置了与此相同的短路保护电路，能够实现电路设计的简化。具体内容在应用手册第 7 章《驱动电路设计方法》中有记载，请参照。图 5-4 表示短路保护动作的波形实例。



2MBI300UD-120

$E_d=600\text{V}$ 、 $V_{GE}=+15\text{V}$ 、 $-5\text{V}$  (EXB841)、 $R_G=3.3\Omega$ 、 $T_j=125^\circ\text{C}$

$V_{CE}=200\text{V/div}$ 、 $I_C=250\text{A}$ 、 $V_{GE}=10\text{V/div}$ 、 $t=2\mu\text{s/div}$

图 5-4 短路保护动作的波形实例

## 2 过电压保护

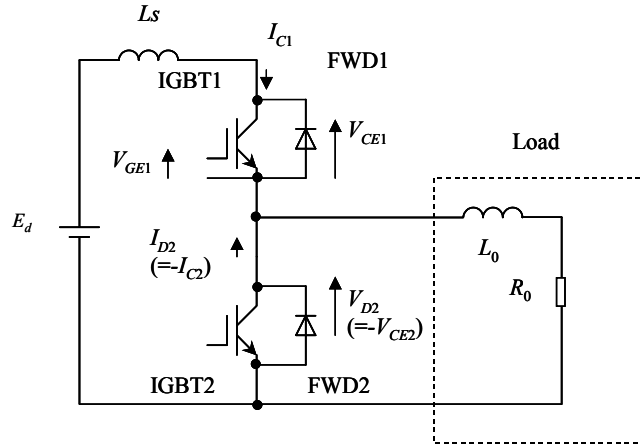
### 2.1 过电压的发生原因及抑制方法

#### 1) 过电压的发生原因

因为 IGBT 的交换速度很快, IGBT 关断时, 或 FWD 反向恢复时会产生很高的  $di/dt$ , 由模块周边的配线电感引发  $L \cdot (di/dt)$  电压 (关断浪涌电压)。

在此, 以 IGBT 关断时的电压波形为例, 介绍其发生原因和抑制方法, 并对具体的电路实例 (IGBT、FWD 均可适用) 予以说明。

作为以测试关断浪涌电压为目的的简单电路, 图 5-5 为斩波电路实例, 图 5-6 为 IGBT 关断时的动作波形图。



\$E\_d\$: 直流电源电压、\$L\_S\$: 主电路的寄生电感、负载: \$L\_0, R\_0\$ 等

图 5-5 斩波电路

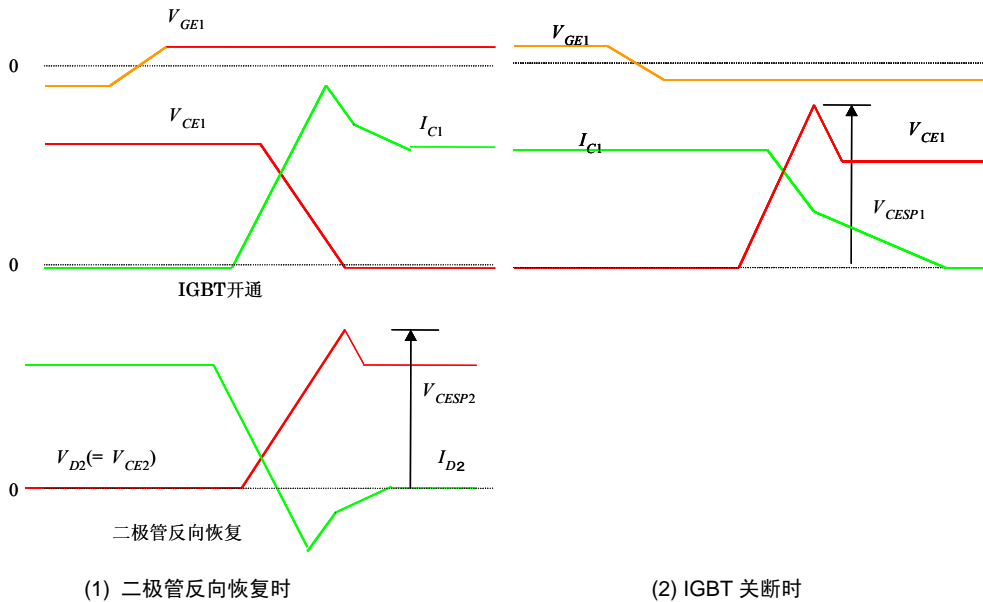


图 5-6 动作波形

关断浪涌电压是由于 IGBT 关断时主电路电流急剧变化，在主电路的寄生电感上诱发高电压而发生的。关断浪涌电压的峰值可以下式求出：

$$V_{CESP} = E_d + (-L_S \cdot dI_c / dt) \cdot \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

\$dI\_c/dt\$: 关断时集电极电流变化率的最大值

\$V\_{CESP}\$ 超过 \$RBSOA\$ 或 \$V\_{CES}\$ 时即导致破坏。

## 2) 过电压的抑制方法

抑制发生过电压的原因的关断浪涌电压的方法有下列几种：

- a. 在 IGBT 中加上保护电路 (=缓冲电路)，吸收浪涌电压。在缓冲电路的电容器中使用薄膜电容，并配置在 IGBT 附近，使其吸收高频浪涌电压。
- b. 调整 IGBT 的驱动电路的  $-V_{GE}$  和  $R_G$ ，减小  $di/dt$ （请参考第 7 章《驱动电路设计方法》）
- c. 尽量将电解电容器配置在 IGBT 的附近，减小配线电感，如果使用低阻抗型的电容器则效果更佳。
- d. 为了减低主电路和缓冲电路的配线电感，配线要更粗、更短。在配线中使用铜条。另外进行并列平板配线（分层配线），使配线低电感化将有很大的效果。

## 2.2 缓冲电路的种类与特征

缓冲电路分为两种：一种是在所有的元件上以 1 对 1 安装缓冲电路的个别缓冲电路，另一种是在直流母线间集中安装的集中式缓冲电路。

### 1) 个别缓冲电路

作为个别缓冲电路的代表实例，有以下几种缓冲电路。

- a) RC 缓冲电路
- b) 充放电型 RCD 缓冲电路
- c) 放电阻止型 RCD 缓冲电路

表 5-3 表示了各个别缓冲电路的连接图、特征及主要用途。

### 2) 集中式缓冲电路

作为集中式缓冲电路的代表实例，有以下几种缓冲电路。

- a) C 缓冲电路
- b) RCD 缓冲电路

最近，以简化缓冲电路为目的，采用集中式缓冲电路的情况正在增多。表 5-4 表示了各集中式缓冲电路的连接图、特征及主要用途，表 5-5 表示使用集中式 C 缓冲电路时的缓冲电容的大致标准，图 5-7 则为缓冲电路关断波形实例。



表 5-3 个别缓冲电路的连接图、特征以及主要用途

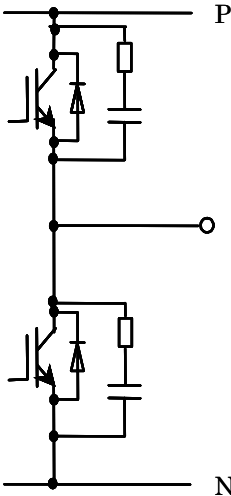
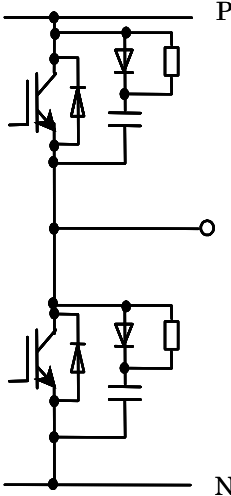
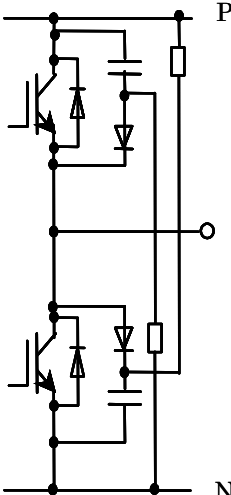
缓冲电路连接图	特征（注意事项）	主要用途
<p>RC 缓冲电路</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 对关断浪涌电压抑制效果明显。</li> <li>• 最适合于斩波电路。</li> <li>• 应用于大容量 IGBT 时，缓冲电阻必须位于低值，结果使关断时集电极电流增大，IGBT 的负荷加重。</li> <li>• 由于缓冲电路的损耗很大，因此不适用于高频用途。</li> </ul>	<p>焊机、 交换电源</p>
<p>充放电型 RCD 缓冲电路</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 对关断浪涌电压有抑制效果。</li> <li>• 与 RC 缓冲电路不同，由于外加了缓冲二极管，缓冲电阻值能够变大，能够回避开通时 IGBT 的负担问题。</li> <li>• 与放电阻止型 RCD 缓冲电路相比，由于缓冲电路中发生的损耗（主要由于缓冲电阻发生的）值非常大，因此不适用于高频交换用途。</li> <li>• 关于充放电型 RCD 缓冲电路的缓冲电阻所发生的损耗可以通过下式求出。</li> </ul> $P = \frac{L \cdot I_o^2 \cdot f}{2} + \frac{C_s \cdot E_d^2 \cdot f}{2}$ <p>L: 主电路的寄生电感              I<sub>o</sub>: IGBT 关断时的集电极电流              C<sub>s</sub>: 缓冲电容器电容              E<sub>d</sub>: 直流电源电压              f: 交换频率</p>	
<p>放电阻止型缓冲电路</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 对关断浪涌电压有抑制效果。</li> <li>• 最适合高频交换用途。</li> <li>• 缓冲电路中发生的损耗少。</li> <li>• 关于充放电型 RCD 缓冲电路的缓冲电阻所发生的损耗可以通过下式求出。</li> </ul> $P = \frac{L \cdot I_o^2 \cdot f}{2}$ <p>L: 主电路的寄生电感              I<sub>o</sub>: IGBT 关断时的集电极电流              f: 交换频率</p>	<p>变频器</p>

表 5-4 集中式缓冲电路的连接图、特征及主要用途

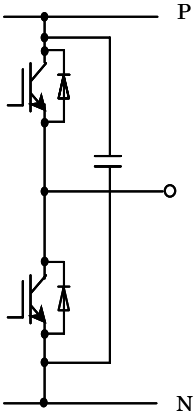
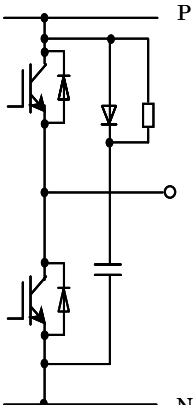
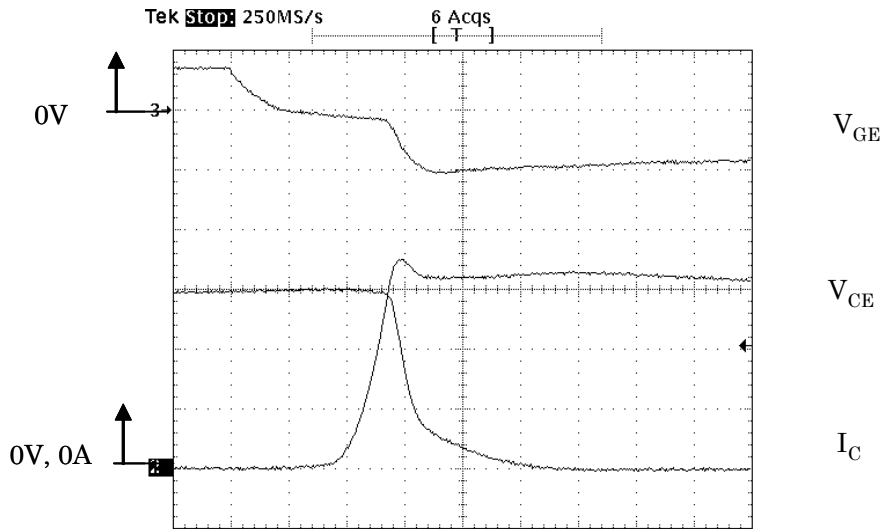
缓冲电路连接图	特征（注意事项）	主要用途
<p>C 缓冲电路</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 最简易的电路</li> <li>• 因由主电路电感与缓冲电容器产生 LC 谐振电路，母线电压容易产生振荡</li> </ul>	变频器
<p>RCD 缓冲电路</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 如果缓冲二极管选择错误，则会发生高的尖峰电压，或者缓冲二极管的反向恢复时电压可能产生振荡。</li> <li>• 可以降低母线电压的振荡。母线配线长的情况下效果明显。</li> </ul>	变频器

表 5-5 集中式 C 缓冲电容的大致标准

元件额定值		项目		主电路寄生电感 ( $\mu\text{H}$ )	缓冲电容 $C_s$ ( $\mu\text{F}$ )
		驱动条件*1			
		$-V_{GE}(\text{V})$	$R_G(\Omega)$		
600V	50A	$\leq 15$	$\geq 68$	—	0.47
	75A		$\geq 47$		
	100A		$\geq 33$		
	150A		$\geq 24$	$\leq 0.2$	1.5
	200A		$\geq 16$	$\leq 0.16$	2.2
	300A		$\geq 9.1$	$\leq 0.1$	3.3
	400A		$\geq 6.8$	$\leq 0.08$	4.7
1200V	50A	$\leq 15$	$\geq 22$	—	0.47
	75A		$\geq 9.1$		
	100A		$\geq 5.6$		
	150A		$\geq 4.7$	$\leq 0.2$	1.5
	200A		$\geq 3.0$	$\leq 0.16$	2.2
	300A		$\geq 2.0$	$\leq 0.1$	3.3

\*1: 表示 U 系列 IGBT 的典型标准门极电阻。



6MBI300UD-120  
 $E_d=600V$ ,  $V_{GE}=\pm 15V$ ,  $I_C=300A$ ,  $R_G=2.2\Omega$ ,  $T_j=125C$ ,  $L_S=65nH$   
 $V_{CE} : 200V/div$ ,  $I_C : 100A/div$ ,  $V_{GE} : 20V/div$ ,  $t : 200ns/div$

图 5-7 关断电流、电压波形

### 2.3 放电阻止型 RCD 缓冲电路的设计方法

下面就作为最合理的 IGBT 的缓冲电路的放电阻止型 RCD 缓冲电路的基本设计方法进行说明。

#### 1) 关于适用与否的研讨

图 5-8 表示应用了放电阻止型 RCD 缓冲电路的关断时的动作轨迹，图 5-9 表示关断时的电流、电压波形。

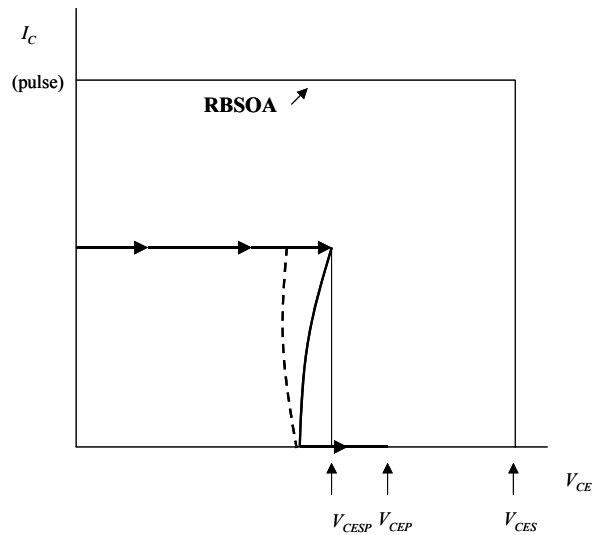


图 5-8 关断时的动作轨迹

放电阻止型 RCD 缓冲电路在 IGBT 中 C-E 间的电压超过直流电源电压时开始动作，它理想的动作轨迹为虚线表示的轨迹。

但是，在实际装置中，由于在缓冲电路的配线电感和缓冲二极管瞬态正向电压下降的影响下，关断时有尖峰电压存在，因此其轨迹如实线所示，右肩处有突起。

为了应用放电阻止型 RCD 缓冲电路，关断时的动作轨迹必须控制在 IGBT 的 RBSOA 区域内。

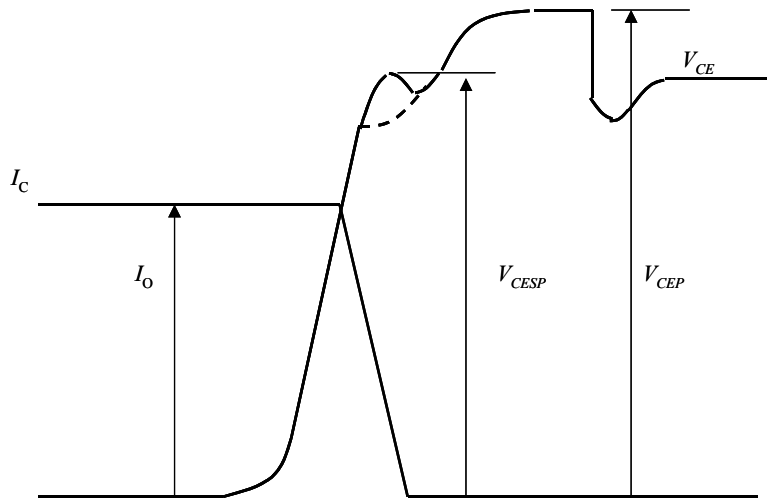


图 5-9 关断时的电流、电压波形

另外，关断时的尖峰电压可以通过下式求出。

$$V_{CESP} = Ed + V_{FM} + (-L_S \cdot dI_c / dt) \dots\dots\dots \textcircled{2}$$

Ed: 直流电源电压

V<sub>FM</sub>: 缓冲二极管瞬态正向电压下降※

L<sub>S</sub>: 缓冲电路的配线电感

dI<sub>c</sub>/dt: 关断时的集电极电流变化率最大值

※缓冲二极管的一般瞬态正向电压下降的参考值如下所示。

600V 级: 20~30V

1200V 级: 40~60V

## 2) 缓冲电容器 (Cs) 电容值的求法

缓冲电容器需要的电容由下式求出。

$$C_S = \frac{L \cdot I_o^2}{(V_{CEP} - Ed)^2} \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

L: 主电路的寄生电感

I<sub>o</sub>: IGBT 关断时的集电极电流

V<sub>CEP</sub>: 缓冲电容器电压的最终到达值

Ed: 直流电源电压

有必要将 V<sub>CEP</sub> 控制在 IGBT 的 C-E 间的耐压值以下。

另外，请选择高频特性良好的缓冲电容器（薄膜电容器等）。

### 3) 缓冲电阻 (Rs) 值的求法

缓冲电阻要求的机能是在 IGBT 下一次关断动作进行前，将存储在缓冲电容器中的电荷放电。  
在 IGBT 进行下一次断开动作前，将存储电荷的 90% 放电的条件下，求取缓冲电阻的方法如下：

$$R_S \leq \frac{1}{2.3 \cdot C_S \cdot f} \dots\dots\dots \textcircled{4}$$

f: 交换频率

缓冲电阻值如果设定过低，由于缓冲电路的电流振荡，IGBT 开通时的集电极电流峰值也增加，请在满足式④的范围内尽量设定为高值。

缓冲电阻发生的损耗 P (Rs) 与电阻值无关，可以由下式求出。

$$P(R_S) = \frac{L \cdot I_o^2 \cdot f}{2} \dots\dots\dots \textcircled{5}$$

### 4) 缓冲二极管的选定

缓冲二极管的瞬态正向电压下降是关断时发生尖峰电压的原因之一。

另外，一旦缓冲二极管的反向恢复时间加长，高频交换动作时缓冲二极管产生的损耗就变大，缓冲二极管的反向恢复急剧，并且缓冲二极管的反向恢复动作时的 IGBT 的 C-E 间电压急剧地大幅度振荡。

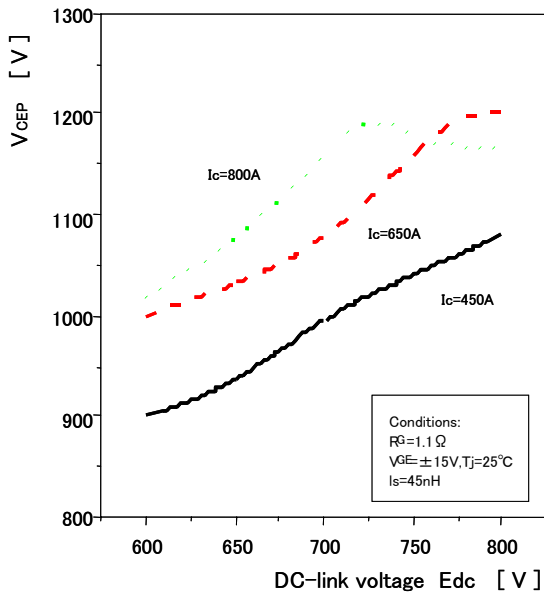
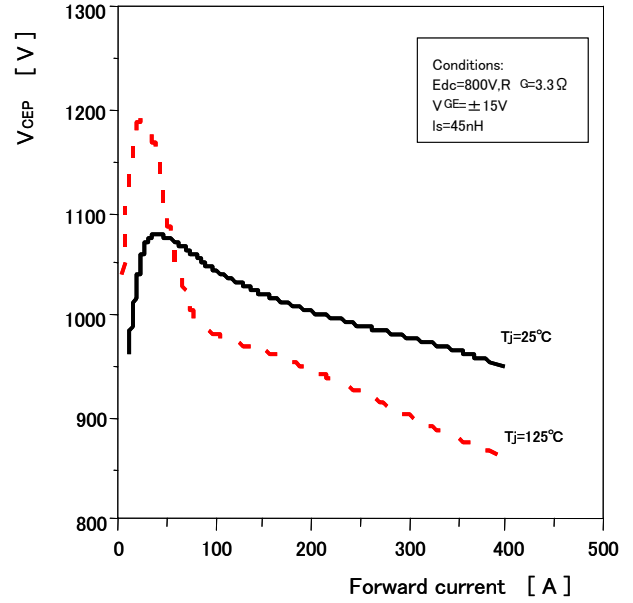
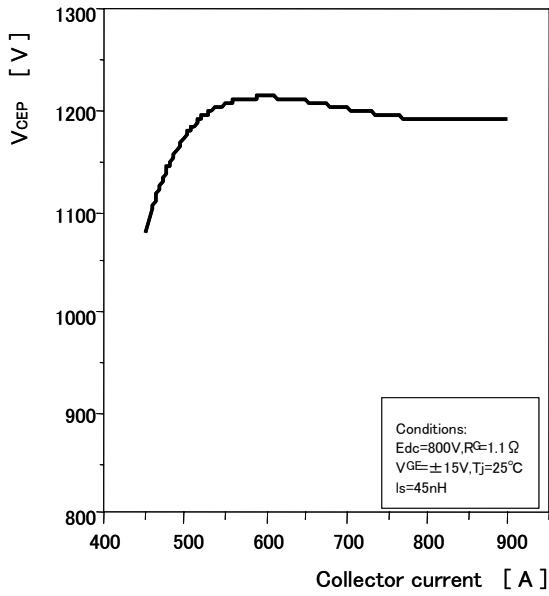
请选择瞬态正向电压低，反向恢复时间短，反向恢复平顺的缓冲二极管。

### 5) 缓冲电路配线上的注意事项

因缓冲电路的配线产生的电感是发生尖峰电压的原因，请尽量在包括电路部品的配置等方面想方设法降低电感。

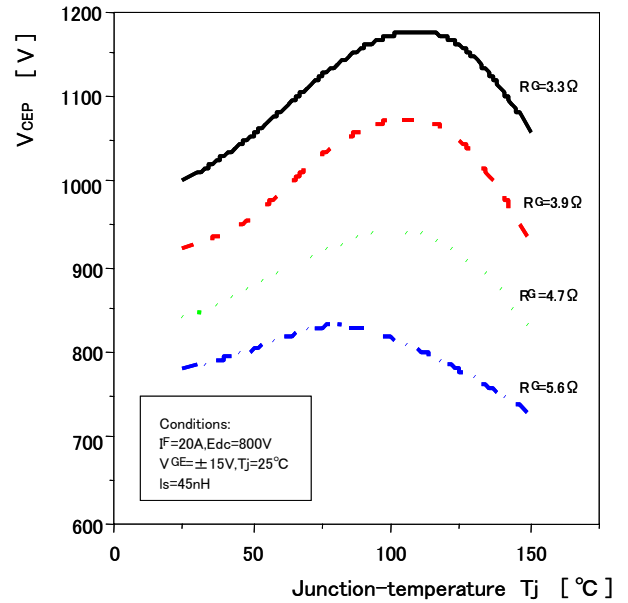
## 2.4 浪涌电压的特性实例

为浪涌电压的实际特性例，图 5-10 表示 U 系列 IGBT 6MBI450U-120 的关断时的浪涌电压特性。一般，集电极电流越多，则关断时的浪涌电压越大。图 5-11 表示 U 系列 IGBT 6MBI450U-120 的 FWD 的反向恢复时的浪涌电压。通常，集电极电流在额定电流的几分之一到几十分之一的低电流范围中，反向恢复时的浪涌电压变大。请在确认全部的动作条件均在 RBSOA 以内或在 V<sub>CES</sub> 范围内之后再使用。



6MBI450U-120

图 5-10 IGBT 关断时的浪涌电压



6MBI450U-120

图 5-11 二极管反向恢复时的浪涌电压

## 警 告

1. 本目录包含截止至 2004 年 2 月的产品规格、特性、数据、材质以及结构。  
因规格改变或其它原因而使本内容变更，恕不另行通知。在使用本目录中所列的产品时，请务必获取最新版本的规格说明。
2. 本目录中所述的所有应用乃举例说明富士电机电子设备技术株式会社产品的使用，仅供参考。并不授予（或被视为授予）富士电机电子设备技术株式会社所拥有的任何专利、版权、商业机密或其它知识产权的任何授权或许可，无论是明示的或暗示的。对于可能因使用此处所述的应用而造成侵犯或涉嫌侵犯他人知识产权的，富士电机电子设备技术株式会社不予作出任何明示或暗示的声明或保证。
3. 尽管富士电机电子设备技术株式会社不断加强产品质量和可靠性，但仍可能会有一小部分的半导体产品出现故障。当在您的设备中使用富士电机电子半导体产品时，您应采取足够的安全措施以防止当任何产品出现故障时，导致该设备造成人身伤害、火灾或其它问题。我们建议，您的设计应能够自动防故障、阻燃并且无故障。
4. 本目录中介绍的产品用于以下具有普通可靠性要求的电子和电气设备。
  - 计算机 · OA 设备 · 通信设备（终端设备）· 测量设备 · 机床
  - 视听设备 · 家用电气设备 · 个人设备 · 工业机器人等
5. 如果您要将本目录中的产品用于具有比普通要求更高可靠性要求的设备，例如以下所列设备，则必须联系富士电机电子设备技术株式会社，得到事先同意方可使用。在将这些产品用于下述设备时，您应采取足够措施（如建立备份系统），使得即使用于该设备的富士电机电子设备技术株式会社产品出现故障，也不会导致该设备发生故障。
  - 运输设备（安装在汽车和船上） · 干线通信设备 · 交通信号控制设备
  - 具有自动关闭功能的漏气检测装置 · 防灾 / 防盗装置 · 安全装置
6. 请勿将本目录中的产品用于具有严格可靠性要求的设备，例如（但不限于以下设备）
  - 航天设备 · 航空设备 · 核反制设备 · 海底中继器 · 医疗设备
7. 版权(c)1996-2004 富士电机电子设备技术株式会社。版权所有。  
未经富士电机电子设备技术株式会社明确许可，本目录的任何部分不能以任何形式或任何方式进行复制。
8. 如果您对本目录中的内容存有疑问，请在使用该产品前咨询富士电机电子设备技术株式会社或其销售代理商。  
富士电机电子设备技术株式会社和其销售代理商对未遵守此处所做说明使用本产品而造成的任何伤害不予负责。