

0 功率半导体的工作原理

0.1 基本开关过程

除了少数特殊的应用之外,功率半导体主要工作在开关状态下。这一事实贯穿于所有电力电子线路中,它们的基本原理和工作方式是相同的。对于任何功率半导体的研究及其在电路中的应用来说,目的都是使其尽可能地工作在低损耗状态。这一追求的终极情形便是一个理想开关,它的工作特性将在下面讨论。

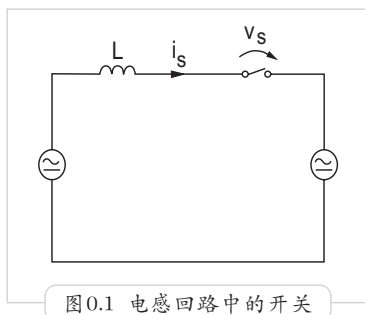
理想开关

- 导通状态: $v_s = 0; -\infty < i_s < \infty$
- 关断状态: $i_s = 0; -\infty < v_s < \infty$
- 开关特性: 无能量转换,可主动开通与关断

此类理想开关的应用,以及建立在此基础上功率半导体的应用,受到开关条件的限制。

含电感的开关回路(外加电流)

在一个含有电感元件的回路中(图 0.1),开关可以主动地开通。也就是说,它能够在任意时刻开通。当开通时间趋近零时,开关中不出现损耗,原因是回路电感能够立即吸收所出现的电压差。



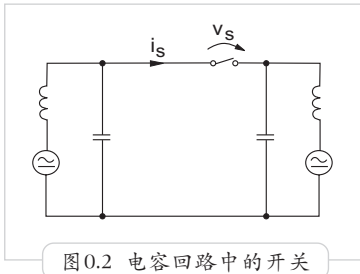
- 导通状态: $v_s = 0; -\infty < i_s < \infty$
- 关断状态: $i_s = 0; -\infty < v_s < \infty$
- 开关特性: 当 $|v_s| > 0$ 时,主动开通
当 $i_s = 0$ 时,被动关断

图0.1 电感回路中的开关

当回路中有电流时,由于在电感 L 中储存的能量必须被释放,所以不可能实现无能量转换的关断过程。因此,在没有能量转换的情况下,开关只能在 $i_s = 0$ 时关断。而此关断时刻是由回路中电流的运行曲线所决定的,故该过程被称为被动关断。一个仅在此开关条件下工作的开关被称为零电流开关(ZCS = Zero Current Switch)。

含电容的开关回路(外加电压)

由于开关上外加电压的作用(图 0.2),无损耗的开通过程仅在 $v_S = 0$ 时才可以实现。而此时电压的运行曲线及其过零时刻均由外部电路所决定,故该过程被称为被动开通。与之相反,开关的关断可主动地进行,且可发生于任意时刻。在以上开关条件下工作的开关被称作零电压开关(ZVS = Zero Voltage Switch)。



- 导通状态: $v_S = 0; -\infty < i_S < \infty$
- 关断状态: $i_S = 0; -\infty < v_S < \infty$
- 开关特性: 当 $|i_S| > 0$ 时, 主动关断
当 $v_S = 0$ 时, 被动开通

图 0.2 电容回路中的开关

图 0.3 显示了上述基本开关过程中开关的电压和电流曲线。采用实际的电力电子元件作为开关时,存在着下述关系:

主动开通时,将要接续电流的开关两端具有正向电压。当开关被控制器触发开通后,该电压降低,且开关电流的上升过程由半导体器件的开通机制所决定。

与回路的串联电感一起,半导体的开通机制限制了电流的上升速度,并影响了回路中半导体器件和电感之间的电压分布。对于给定的半导体器件,开通损耗随电感值的增大而减小,直至一个最小值。

一个具有正向电流的半导体器件在被动关断时,电流在外部电压的作用下先是降至零。此时,半导体中储存的载流子使得电流向相反的方向流动,直至半导体器件重新获得截止能力,并开始承受回路的反向电压为止(反向恢复电流)。

处于导通状态下的半导体器件在主动关断时,当控制器触发后,器件的电压先是正向上升。然后,一个有效的并联电容接续器件的电流。电流的上升速度由器件的关断机制所决定。对于给定的半导体器件,关断损耗随电容值的增加而降低。

一个被动开通的半导体器件在开通前具有反向电压。如果在外电路的作用下,该电压变为正值,器件将承受正向电流。若该电流上升速度过快,则会引起开通过电压。

对于任何一个电力电子单元来说,它的基本运行原理不外乎以下两种:

第一,在交换能量的网络之间,开通与关断过程依次由一个开关来实现——称为“单开关的循环开关过程”;

第二,有两个开关交替开通与关断,同时它们交互接替电流以及电压——称为“换流过程”(有时亦作换相过程)。

这两种基本过程可以出现于同一个电路中不同的工作点上。电路的分析则可因此而细分为不同的工作模式。

开关过程	波形	等效电路
<p>主动开通</p> $\frac{di_s}{dt} > 0 ; \quad \frac{dV_s}{dt} < 0$		<p>$V_q > 0$</p>
<p>被动关断</p> $\frac{di_s}{dt} < 0 ; \quad \frac{dV_s}{dt} < 0$		<p>$V_q < 0$</p>
<p>主动关断</p> $\frac{di_s}{dt} < 0 ; \quad \frac{dV_s}{dt} > 0$		<p>$V_s > 0$</p>
<p>被动开通</p> $\frac{di_s}{dt} > 0 ; \quad \frac{dV_s}{dt} > 0$		<p>$V_s > 0$</p>
基本开关过程		

图0.3 基本开关过程