

3.4 功率回路的设计

MOSFET、IGBT 或 SKiPPACK 模块的功率回路可以由印刷线路板、铜线、导电铜排或铝排构成，取决于模块所开关的电流和电压等级。

除了常规的安装规定以外，例如，爬行距离、电火花间隙或电流密度，由于系统的开关时间极短，约在纳秒至微秒范围内，功率回路的设计还需满足高频技术的要求。

3.4.1 寄生电感和电容

为了分析变流器中寄生电感和电容的影响，让我们来看一个换流回路。

图 3.23 显示了一个带有寄生元件的 IGBT 变流器的换流回路。它由直流电压源 v_d (对应于换流电压 v_k) 与两个带有驱动器和反向二极管的 IGBT 开关所组成。换流电压由直流母线电容 C_d 所维持。外加电流 i_L 从换流回路流出。

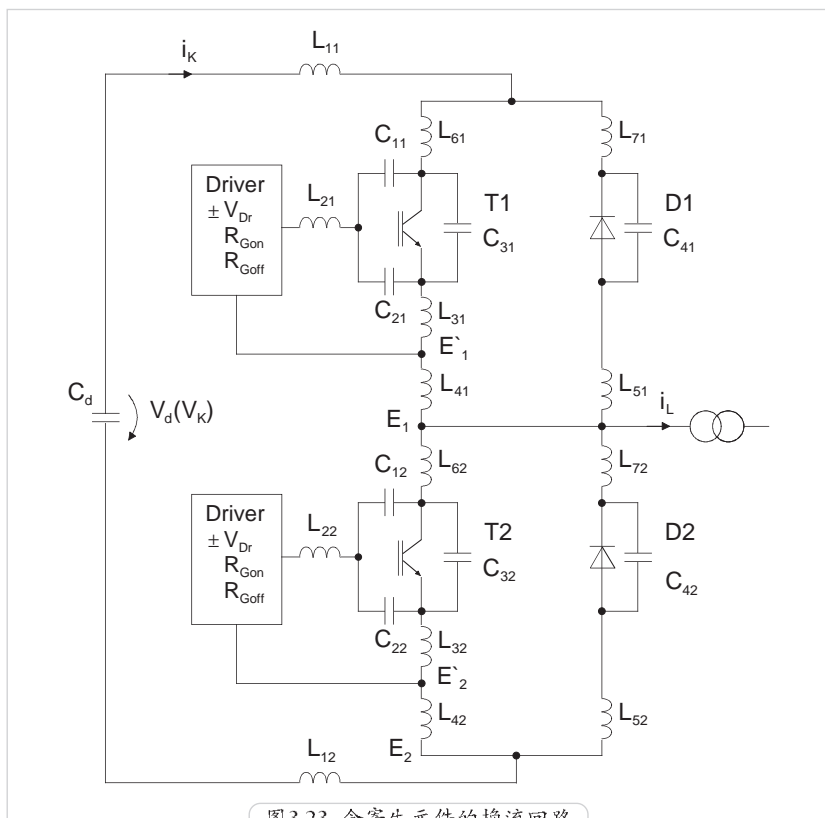


图 3.23 含寄生元件的换流回路

寄生元件的影响与应对措施

换流回路的总电感

在含有 T1 和 D2 的换流回路中,参与换流的总电感是 L_{11} 、 L_{61} 、 L_{31} 、 L_{41} 、 L_{72} 、 L_{52} 与 L_{12} 之和。同理,在含有 D1 和 T2 的换流回路中, L_{11} 、 L_{71} 、 L_{51} 、 L_{62} 、 L_{32} 、 L_{42} 与 L_{12} 之和为有效电感。

当 T1 或 T2 主动开通时,换流回路的总电感缓解了开通过程,使 T1 或 T2 的开通损耗得以降低(见 3.8 章)。

但当 T1 和 T2 主动关断以及在 D1 和 D2 反向恢复时,由于 di/dt 很高,回路电感会在晶体管 and 二极管中感应出开关过电压。这一效应使得关断损耗增加,且功率半导体的电压应力也随之增加。

这一效应的负面影响在短路和过载时尤为突出(参阅 3.6 章)。另外,当线路中还存在着寄生电容时,可能会引起高频振荡。

因此,在采用硬开关的变流器中,换流回路的总电应当尽可能地小。除了 L_{11} 和 L_{12} 以外,其它部分的换流电感均为模块的内部电感,用户无法改变。所以,功率模块制造商的责任在于通过不断改善模块的构造技术以使其内部电感最小化(见 1.4 章)。

SEMIKRON 在参数表中给出了模块主回路端子之间的有效内部电感(例如,SKM100GB123D: $L_{CE} = \max. 30 \text{ nH}$)。

如果模块仅含一个开关(一只 IGBT 或 MOSFET 加一只反向二极管),则在其构成逆变器的一相时,应使两个模块之间的连线电感尽可能地小。

特别重要的是注意保持直流母线回路的电感尽可能地小。这在一方面包含了母线电容的铜排放置方式,在另一方面则包含了功率模块与直流回路的连接方式。在实际的变流器结构中,层叠状的铜排系统(平行且相互靠紧的铜板)得到了广泛的应用。此类结构可将铜排的电感降低至 25–50 nH 的范围。图 3.31 显示了其中几例的结构形式。

余下来的电感 $L_{11}+L_{12}$ 对功率模块仍有影响,但可以通过在功率模块的直流回路端子间并联 C、RC 或 RCD 等缓冲电路来进一步减小。在大多数情况下,一个由薄膜电容构成的简单 C 缓冲电路便足够了,电容值约在 0.1–2 μF 之间。

发射极或源极边的电感

发射极或源极边的电感成份 L_{31} 及 L_{32} 既位于功率回路,也位于晶体管的驱动回路。

当晶体管的电流快速变化时,所感应的电压将反馈到驱动回路(发射极或源极反馈)。这一现象将延缓栅极–发射极电容在开通时的充电速度以及在关断时的放电速度,从而使开关时间和损耗增加。

另一方面,如果在模块附近发生负载短路,则发射极反馈现象可以被用来限制集电极电流的 di/dt 。

为了降低电感 L_{31} 及 L_{32} ,功率模块往往在发射极处具有一个独立的驱动端子。

如果逆变器底部开关的驱动电路由一个共同的电源来供电的话,则位于驱动地线和直流回路负极之间的寄生电感可能会在对地回路中引起振荡。对此,可以在驱动电源输出端附加高频稳定电路。对于大功率变流器来说,可以采用隔离的独立驱动电源。

电感 L_{21} 和 L_{22}

L_{21} 以及 L_{22} 为驱动器末极和晶体管之间的引线电感。它除了使驱动回路的阻抗增加以外,还可能与晶体管的输入电容一起引发振荡。其解决办法是在驱动器末极和晶体管之间采用尽可能短的低电感引线。

电容

图 3.23 中所示的电容 C_{xx} 表示了功率半导体的本征电容。它们随电压而变化,具有非线性的特性,且不能被用户所影响。它们构成了换流电容 C_k 的最小值。从原理上来说,它们有利于降低关断过程中的损耗(见第 0 篇和第 3.8 章)。

在主动开通时,换流电容的充放电会引起附加损耗。在多数 MOSFET 的高频应用中(100kHz 上下),这一现象应得到注意。

C_{11} 和 C_{12} 还对栅极产生 dv/dt 的反馈效应(米勒效应,见图 3.35)。

器件的本征电容与开关附近的电感一起可能会引发振荡。

3.4.2 电磁干扰与对电网的干扰

3.4.2.1 变流器的过程

如果考察一个变流系统的运行过程,则我们可以看到,功率模块的开关工作方式一方面会产生不受欢迎的干扰,另一方面则构成了我们所期望的能量传递及必要的信号处理过程(图 3.24)。