

IGBT 的 ZVC/ZCC 驱动模式*

王保强**

(成都气象学院电子系 成都 610041)

【摘要】 对 IGBT 的工作特性及存在的问题进行了深入探讨, 详细介绍了用于提高大功率 IGBT 电桥的开关效率和安全性 ZVC/ZCC 驱动模式。该模式利用 IGBT 的反向雪崩特性和电荷转移法实现 IGBT 的零电压切换和零电流切换, 从而有效地抑制了器件内部的电流拖尾和自锁效应, 大大地减小了开关损耗, 提高了功率 IGBT 的工作效率和安全性。

关键词 功率电子学; 软驱动; 开关效率; 安全性

中图分类号 TN323.4

IGBT 是一种先进的功率器件, 是 BJT 和 FET 的结合物, 呈现 BJT 的低饱和电压特性和 MOSFET 的高开关速度及小功率驱动等特性。由于 IGBT 主要应用于大功率电子技术, 因此, 如何提高其工作效率和安全性是十分重要的。IGBT 的零电压切换和零电流切换 (ZVC/ZCC) 驱动模式具有这两方面的性能, 并可改善其他工作特性。实验证明了用 ZVC/ZCC 驱动技术的 IGBT 全桥的开关效率可高达 95%。

1 IGBT 的工作特性

1.1 IGBT 的主要特点

IGBT 的内部等效电路如图 1 所示^[1], 主体是 N 沟道增强型 MOSFET 与 PNP 型 BJT 的组合。附加 NPN 型 BJT 和 N 沟道 JFET 及具有自动调节作用的 r'_b , 使 IGBT 的自我保护功能增强。IGBT 的门控特性类似 IGFET, 不必象功率 BJT 那样需较大的驱动电流且易被击穿^[2]。另一方面, 它吸取了功率 BJT 的相应优点以弥补功率 FET 的导通电压高、电流容量小的缺陷。与 BJT、MOSFET 及其他大功率半导体器件相比^[3], IGBT 的主要特点是栅极便于控制、沟道电流容量大、通态电阻小、饱和管压 u_{ce} 低等。另外, 其沟道电流具有负的温度系数和自调能力, 使其在一定程度上具有过流、自锁保护功能, IGBT 在功率电子技术中已得到广泛的关注和应用。

1.2 存在的问题

1.2.1 IGBT 的电流拖尾与关断损耗

处于导通状态的 IGBT 被关断, 使 N 沟道中电子电流被切断, 但由于 PNPBJT 内的电荷储存效应, P⁺区域的空穴电流不会马上变为零, 而形成关断电流的拖尾, 如图 2 所示。显然, 这一特性会影响其开关速度, 并引入关断损耗。要保证 IGBT 的高效率, 必须克服其影响。

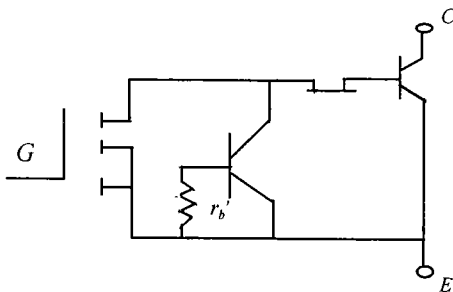


图 1 IGBT 等效电路

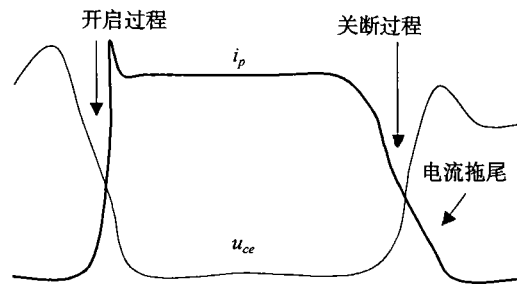


图 2 IGBT 的开关过程(时域)

1999年1月14日收稿

* 国家气象局“八五”气象科学基金资助项目

** 男 49岁 硕士 副教授

1.2.2 IGBT 的开启损耗

如图 2 所示, 开关运用的 IGBT 由关断切换到导通状态, 电流 i_p 不会突变, 其上升时间多为 40~60 ns。此间管压 u_{ce} 下降也历经一定时间, 产生导通损耗。只是存在电容效应, 此损耗并非 u_{ce} 和 i_p 简单相乘之积。

1.2.3 自锁现象

自锁将影响 IGBT 沟道电流的流动。在 $\alpha_{\text{npn}} + \alpha_{\text{pnp}} > 1$ 的条件下, 就会发生静态自锁。采用合理的结构设计和制作工艺, 形成较宽的 N+ 缓冲基区, 使 α_{pnp} 较小。用小的跨接基射极间的 r'_b , 得到小的 α_{npn} 。所以, 小电流自锁的情况较少。但是多余空穴电流经 r'_b 造成动态自锁便不难理解。因此, 大电流运用的 IGBT 应采取措施以避免动态自锁。利用电荷转移实现的 ZCC, 将有利于避免动态自锁的发生。

2 功率损耗分析

假定 IGBT 全桥用于 PWM 电路, IGBT 的管耗 P_T 由下式计算

$$P_T = P_{st} + P_{on} + P_{off}$$

式中 P_{st} 是 IGBT 的静态功耗; P_{on} 和 P_{off} 分别是开启和关闭功耗。

$$P_{st} = D_T \int_0^\pi i_c u_{ce} d\theta = \frac{1}{2} \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_m V_o + \frac{1}{2} I_m^2 R_L \right)$$

$$P_{on} = f_o \sum_{i=1}^n (E_{on})_i = \frac{1}{2} f_c E_{on}$$

$$P_{off} = f_o \sum_{i=1}^n (E_{off})_i = \frac{1}{2} f_c E_{off}$$

式中 E_{on} 是 IGBT 在一个开启过程的损耗; E_{off} 是在一个关闭过程的损耗; f_c 和 f_o 分别是载波和输出电流的频率; I_m 是输出电流的有效值; V_o 是输出电压; R_L 是等效负载; D_T 是 IGBT 的导通角, $n=1/f_c$ 。

IGBT 的开关效率为

$$\eta = P_o / P_E = P_o / (P_o + P_T)$$

式中 P_o 是电桥的输出功率; P_E 是电源提供的总功率。

3 ZVC/ZCC 作用原理

为了提高 IGBT 在大电流工作条件下的开关速度, 提高工作频率, 必须减小各种损耗。在 IGBT 的切换期间, 若预先置其通道电流或管压降为零, 就会降低开启损耗或关断损耗, 这就是零电压切换 ZVC 与零电流切换 ZCC 实现损耗降低的基本原理。IGBT 全桥原理图和实现 ZVC 和 ZCC 的驱动波形如图 3 和图 4 所示。为了减小 IGBT 内部拖尾和自锁效应的影响, 将 ZVC 用于桥的一侧, ZCC 用于另一侧。在图 3 中, 省略了与 $T_1 \sim T_4$ 相并联的续流反向二极管, 这就意味着桥的某条臂将承受反向雪崩电压, 而正是利用这一特点来实现电桥左侧的 ZCC 驱动。

从图 4 可见, ZVC/ZCC 驱动信号不同于传统的相移控制^[4]。 T_2 和 T_4 的控制信号的宽度小于 T_1 和 T_3 的控制信号, 图中阴影区 V_{ge} 为低电平, 各信号之间有特殊的时序关系。在每前半周期, T_1 和 T_4 几乎同时导通, 但 T_4 提前关断。在后半周期, T_3 和 T_2 的工作过程分别与 T_1 和 T_4 相似。因此, T_2 和 T_4 关断时刻分别决定输出波形的后沿, T_1 和 T_3 形成前沿。这种电流模控制方式有利于电路中电流的平衡, 避免变压器 T_R 饱和。

设 T_1 和 T_4 先导通。在 T_4 关断后、 T_1 仍导通期间, 过 T_1 的电流在 C_1 和 C_2 间分流, 使 C_1 放电, C_2 充电 (L_1 和 L_2 足够小, 对 C_2 、 C_1 的充放电过程作用很小)。虽然 T_4 关断后存在拖尾反应, 但 C_2 上电压不能突变, 即 u_{ce2} 由零开始按对 C_2 充电的指数呈规律上升, 实现了 T_4 的零电压切换 ZVC。

显然, T_4 的关断损耗 E_{off} 会大大降低。

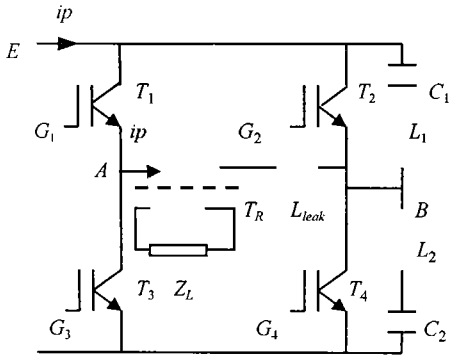


图 3 IGBT 全桥原理图

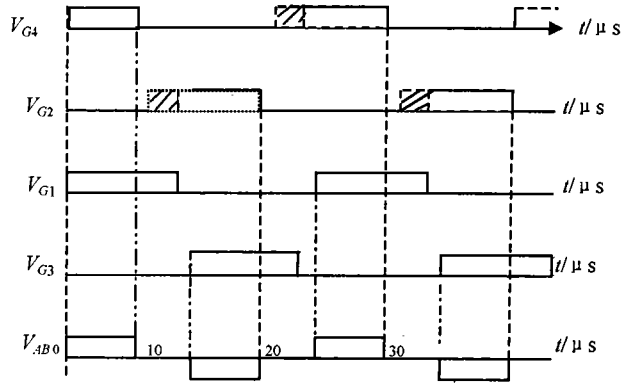


图 4 ZVC/ZCC 驱动定时

L_{leak} 的储能 ($L_{leak}I_p^2/2$) 作用使 C_2 上电压继续上升, 当该电压上升到 20 V~30 V 时, T_2 发生反向雪崩, 此时, T_2 的作用犹如齐纳管, 为 L_{leak} 中能量的释放提供了通道, 直到 i_p 降为零。这时, B 点电位高于电压 E , I_p 便由零开始反方向增加, 并流过仍处于导通状态的 T_1 , 这将帮助 T_1 释放体内存储的电荷而大大减小 T_1 关断时的效应, 使其近似在零电流处关断, 故称为零电流切换 ZCC, 并明显减小关断损耗 E_{off} 。另外, IGBT 内部电荷的释放有利于避免动态自锁的发生。

随着 B 点电位下降, 在 $u_{ce2}=0$ 时, 打开 T_2 , 其开启损耗 E_{on} 也几乎为零, 即 T_2 也受益于 ZVC。 T_1 完全关断几微秒后, T_3 打开, 开始下半周工作。 T_3 因 ZCC 而减小关闭损耗的理由同 T_1 。因此, 桥的 T_2 、 T_4 侧按 ZVC 方式切换, 而 T_1 、 T_3 侧按 ZCC 方式切换。另一方面, 由于在工作周期的部分时间内, IGBT 处于近似零电压或零电流状态, 无疑提高了器件的安全性。即 ZVC/ZCC 驱动模式有效地抑制 IGBT 内部的电流拖尾和自锁, 提高了开关效率和安全性。文献[5]中的 ZCS 与上述 ZCC 有相似之处, 但阐述的角度不同, 尚未见具体实现方法。

4 实验效果

实验条件为: 实验原理图和 ZVC/ZCC 驱动波形参考图 3 和图 4; $f_c=30\text{ kHz}$; $E_{dc}=240\text{ V(dc)}$, $T_{emp}=28^\circ\text{C}$ 。

主要实验仪器为: TDS-100MHZ 双踪示波器一台, 20A 交、直流电流表各一台, 970 型万用表一部, DVCC-96 单片机开发系统一套。

实验结果: ZCC 驱动模式使 IGBT 的电流拖尾由原来的 160~180 ns 降低到 20~30 ns, 其他结果为:

$$\begin{aligned}
 E &=240\text{ V(dc)} & I_p &=6.5\text{ A(ac)} & P_E &=1\ 560\text{ W} \\
 V_o &=125\text{ V(ac)} & I_o &=11.88\text{ A(ac)} & P_o &=1\ 486\text{ W} & \eta &=P_o/P_E=95.2\%
 \end{aligned}$$

由于各个器件工作条件不同, 每个 IGBT 的损耗有一定差异:

$$\begin{aligned}
 P_{off1} &=2.5\text{ W} & P_{off2} &=5.93\text{ W} & P_{off3} &=2.53\text{ W} & P_{off4} &=0.24\text{ W} \\
 P_{on1} &=7.2\text{ W} & P_{on2} &=0.21\text{ W} & P_{on3} &=7.21\text{ W} & P_{on4} &=6.21\text{ W}
 \end{aligned}$$

变压器 T_R 和其他部件的损耗及 IGBT 的静态损耗约 43 W。另外, 经过过流和短路实验, 证明该电路具有良好的过流和短路保护性能。

5 结束语

ZVC/ZCC 驱动模式可有效地抑制 IGBT 自身存在的沟道电流拖尾和克服动态自锁, 与以往使用的各种方法相比, 可显著提高开关效率和安全性。当然, 如其高达 95% 的效率, 需要仔细调整电

路参数才能达到。如果负载电流过小，会因为 C_1 、 C_2 充、放电不够充分而影响 ZVC 和 ZCC 的准确性，使效率有所下降，但只要调试得当，其影响并非很大。

参 考 文 献

- 1 Fuji Electric Co Ltd. IGBT's Instruction. Tokyo, Japan, 1993
- 2 OGVRA T, NAOGAWA A. IGBT mode turn-off thyristor (IGTT) fabricated on SOI substrate. IEEE international electron devices meeting, 1996: 241~244
- 3 Palmer P R, D A Hinchy, Stark B H. Mos and bipolar gated thyristor: a thyristor with IGTBT switching characteristics. IEE Proceedings, Circuits, Devices and Systems, 1998, 145(2): 105~110
- 4 HAMEL J S. An accurate charge control approach for modeling excess phase-shift in the base region of BJT. IEEE Trans Electron Devices, 1996, 43(7): 1 092~1 098
- 5 Lefebere S, Forest F. Turn-off analysis of PT and NPT IGTBS in zero-current switching. IEE proceedings, Circuits, Devices and Systems, 1998, 145(3): 185~191

ZVC/ZCC Driving Mode for IGBT

Wang Baoqiang

(Dept. of Electronics, CIM Chengdu 610041)

Abstract In this paper, some problems about IGBT's operation characteristics are discussed. A driving mode called zero voltage commutation and zero current commutation (ZVC / ZCC) technique with high efficiency and safety is introduced. By making use of removing charges and reverse avalanche of IGBT, zero voltage or zero current occurs during the commutation course of IGBT. It is very useful for reducing the effects of tailing and latching and improving the operation efficiency and safety .

Key words power electronics; softdrive; switching efficiency; safety

· 科研成果介绍 ·

表面波吸波涂料及评估方法

主研人员：王锡良 冯永成 卿显明 沈丽英 张其劲

该项目研究了表面波的分类及其激励、传播、散射机理，合理确定了以衰减系数 α (dB/cm) 作为表面波吸波涂料的评估参数。完成了金属平面模型、圆柱模型涂敷吸波涂料后被导表面波，爬行波的理论分析、计算。提出了将表面波电流的数值解与 Prony 方法相结合，提取表面主模和高次模的传播常数和幅度因子的新方法，为表面波吸波涂料的性能评估奠定了理论基础。同时建立了 8GHz~18GHz 实验测试系统，对测试模型及测量区域进行了深入研究。

· 科 下 ·