

了解何时、何地及如何使用 IGBT

最近，碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 等宽禁带半导体的应用日益增多，受到广泛关注。然而，在这些新技术出现之前，许多高功率应用都是使用高效、可靠的绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)，事实上，许多此类应用仍然适合继续使用 IGBT。在本文中，我们介绍 IGBT 器件的结构和运行，并列举多种不同 IGBT 应用的电路拓扑结构，然后探讨这种多用途可靠技术的新兴拓扑结构。

作者：安森美产品线经理 Jinchang Zhou

IGBT 器件结构

简而言之，IGBT 是由 4 个交替层 (P-N-P-N) 组成的功率半导体晶体管，通过施加于金属氧化物半导体 (MOS) 栅极的电压进行控制。这一基本结构经过逐渐调整和优化后，可降低开关损耗，且器件厚度更薄。近期推出的 IGBT 将沟槽栅与场截止结构相结合，旨在抑制固有的寄生 NPN 行为。该方法有助于降低器件的饱和电压和导通电阻，从而提升整体功率密度。

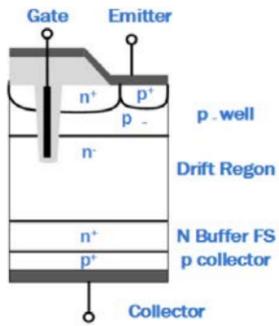


图 1: 沟槽场截止 IGBT 结构

应用与拓扑结构

如今，IGBT 通常用于特定应用的拓扑结构，下面列举了其中的几种。

焊机

如今许多焊机使用逆变器，而非传统的焊接变压器，因为直流输出电流可以提高焊接过程的控制精度。使用逆变器还有其他优势，比如直流电流比交流电流安全，而且采用逆变器的焊机具有更高的功率密度，因此重量更轻。功率级（单相或三相）将交流输入电压转换为逆变器的直流母线电压。输出电压通常为 30 V，但一旦启动电弧，在开路负载操作几乎低至 0 V 的情况下（短路条件），输出电压可能高达 60 V DC。

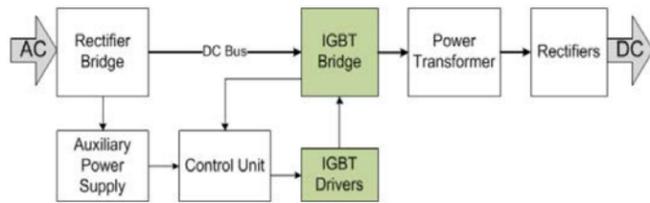


图 2: 焊机框图

焊接逆变器中常用的拓扑结构包括全桥、半桥和双管正激，而恒定电流是最常用的控制方案。占空比因负载电平和输出电压而异。全桥和半桥拓扑结构的 IGBT 开关频率通常在 20 至 50 kHz 之间。

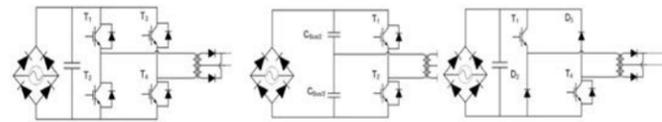


图 2: 全桥、半桥和双管正激拓扑结构

电磁炉

电磁炉的原理是，当高磁导率材质的锅靠近线圈时，通过励磁线圈推动（或耦合）锅内的电流循环。其运行方式与变压器大致相同，其中线圈负责初级侧，电磁炉底部负责次级侧。产生的大部分热量来源于锅底层形成的涡电流循环。这些系统的能量传输效率约为 90%，而顶部光滑的无感电器装置的能效仅为 71%，相比之下，（对于同量热传递）前者可节省大约 20% 的能量。逆变器将电流导入铜线圈，从而产生电磁场，电磁场穿透锅底，形成电流。产生的热量遵循焦耳效应公式，即锅的电阻乘以感应电流的平方。

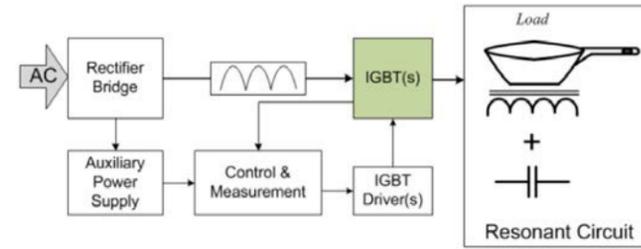


图 3: 电磁炉框图

对于电磁炉，比较重要的要求包括：

- 高频开关
- 功率因数接近一
- 宽负载范围

感应加热应用的输出功率控制通常基于可变频率方案。这是一种根据负载或线路频率变化来应用的基本方法。然而，该方法存在一个主要缺点：若要在宽范围内控制输出功率，频率需要大幅变化。

感应加热最常用的拓扑结构基于谐振回路。谐振转换器的主要优势是高开关频率范围，同时能效不会降低。谐振转换器采用零电流开关 (ZCS) 或零电压开关 (ZVS) 等控制技术来降低功率损耗。谐振半桥 (RHB) 转换器和准谐振 (QR) 逆变器是备受欢迎的拓扑结构。RHB 结构的优势包括负载工作范围大，并且能够提供超高功率。

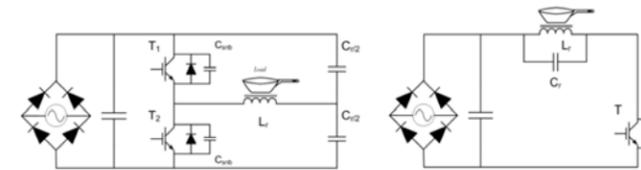


图 4: RHB 和 QR 拓扑结构

QR 转换器的主要优势是成本较低，因此非常适合低至中功率范围（峰值功率高达 2 kW）、工作频率介于 20 至 35 kHz 之间的应用。

电机驱动

半桥转换器 (HB) 是电机驱动应用中一种最常见的拓扑结构，频率介于 2kHz 至 15kHz 之间。HB 输出电压取决于开关状态和电流极性。

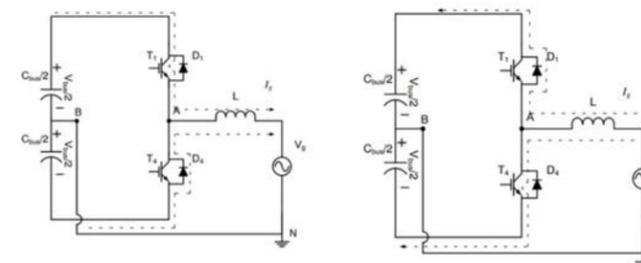


图 5: 半桥拓扑结构显示正输出电流和负输出电流

考虑到电感负载，电流随后会增加。如果负载汲取正电流 ($I_g > 0$)，它将流经 T1，为负载提供能量 (V_g)。相反，如果负载电流 I_g 为负，电流经由 D 流回，将能量返回至直流电源。同样，如果 T4 开通（且 T1 关闭），会有 $-V_{bus}/2$ 的电压施加于负载，且电流会减小。如果 I_g 为正，电流流经 D4，将能量返回至母线电源。

适合 IGBT 应用的多电压等级拓扑结构

快速开关给 HB 拓扑结构带来的局限性包括：

- 只有两个输出电压等级
- 无源和有源元件受到应力
- 高开关损耗
- 栅极驱动难度加大
- 纹波电流升高
- EMI 变高
- 电压处理（无法与高电压母线结合使用）
- 器件串联增加了实施工作的复杂性
- 难以达到热平衡
- 高滤波要求

为了摆脱这些局限性，在不间断电源 (UPS) 和太阳能逆变器等应用中，采用新的多电压等级拓扑结构。常见结构包括单极性开关 I 型和 T 型转换器，它们能够在较高的母线电压下工作。随着可用输出状态增多，滤波器元件之间的电压相应减小，因此滤波损耗也更低，元件更小。开关损耗有所降低，而导通损耗则小幅增加（适合 16kHz - 40kHz 的较高频率，可达到约 98% 的高能效）。

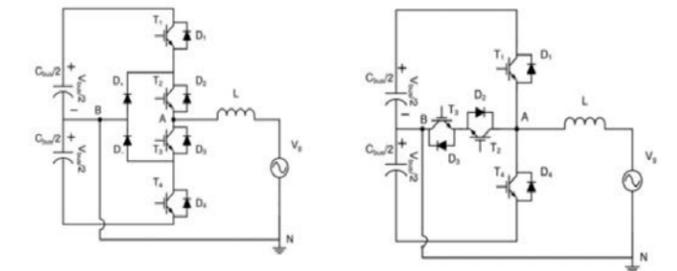


图 6: I 型和 T 型转换器拓扑结构

IGBT 的未来

尽管 IGBT 已经问世很多年，但该技术仍是许多高压和电流应用的理想之选。IGBT 不仅越来越多地应用于传统设计，还应用于新设计，因为新推出的器件在不断地推动 V_{cesat} 降低至 1V，并通过新型结构来提高电流密度和开关损耗。若要在使用 IGBT 的过程中获得最大效益，一个关键因素是先了解应用要求，然后选择合适的电路拓扑结构加以实施。