

采用优化高电压 IGBT 设计高效率太阳能逆变器

随着绿色电力运动势头不减，包括家电、照明和电动工具等应用，以至其他工业用设备都在尽可能地利用太阳能的优点。为了有效地满足这些产品的需求，电源设计师正通过最少数量的器件、高度可靠性和耐用性，以高效率把太阳能源转换成所需的交流或者直流电压。

要为这些应用以高效率生产所需的交流输出电压和电流，太阳能逆变器就需要控制、驱动器和输出功率器件的正确组合。要达到这个目标，在这里展示了一个针对 500W 功率输出进行优化，并且拥有 120V 及 60Hz 频率的单相正弦波的直流到交流逆变器设计。在这个设计中，有一个 DC/DC 电压转换器连接到光伏电池板，为这个功率转换器提供 200V 直流输入。不过在这里没有提供太阳能电池板的详细资料，因为那方面不是我们讨论的重点。

现在，市场上有不同的高级功率开关，例如金属氧化物半导体 FET (MOSFET)，双极型三极管 (BJT)，以及绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 来转换功率。然而，这个应用要达到最高的转换效率和性能要求，就要选择正确的功率晶体管。

多年来的调查和分析显示，IGBT 比其他功率晶体管有更多优点，当中包括更高电流能力，利用电压而非电流来进行栅极控制，以及能够与一个超快速恢复二极管协同封装来加快关断速度。此外，工艺技术及器件结构的精细改进也使 IGBT 的开关性能得到相当的改善。其他优点还包括更好的通态性能，以及拥有高度耐用性和宽安全工作区。在考虑这些质量之后，这种功率逆变器设计就会选用高电压 IGBT，作为功率开关的必然之选。

因为这个设计所实施的逆变器拓扑属于全桥，所以有关的太阳能逆变器采用了 4 个高电压 IGBT，如图 1 所示。在这个电路中，Q1 和 Q2 晶体管被指定为高侧 IGBT，而 Q3 和 Q4 则为低侧功率器件。为了要保持总功率耗损处于低水平，但功率转换则拥有高效率，设计师要在这个 DC/AC 逆变器解决方案正确应用低侧和高侧 IGBT 组合。

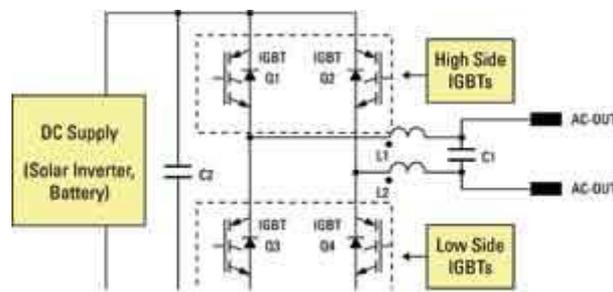


图 1 采用 4 个 IGBT 的逆变器设计

沟道和平面 IGBT

为了要同时把谐波和功率损耗降到最低，逆变器的高侧 IGBT 利用了脉宽调制(PWM)，同时低侧功率器件就用 60Hz 进行变化。通过把 PWM 频率定在 20kHz 或以上操作，高侧 IGBT 有 50/60Hz 调制，输出电感器 L1 和 L2 便可以保持实际可行的较少尺寸，提供有效的谐波滤波。再者，逆变器的可听声也可以降到最低，因为开关频率已经高于人类的听觉范围。

我们研究过采用不同 IGBT 组合的各种开关技术后，认定能够实现最低功率耗损和最高逆变器性能的最好组合，是高侧晶体管利用超高速沟道 IGBT，而低侧部分就采用标准速度的平面器件。与快速和标准速度平面器件比较，开关频率在 20kHz 的超高速沟道 IGBT 提供最低的总通态和开关功率损耗组合。高侧晶体管的开关频率为 20kHz 的另外一个优点，是输出电感器有合理的小尺寸，同时也容易进行滤波。在低侧方面，我们把标准速度平面 IGBT 的开关频率定在 60Hz，使功率损耗可以保持在最低的水平。

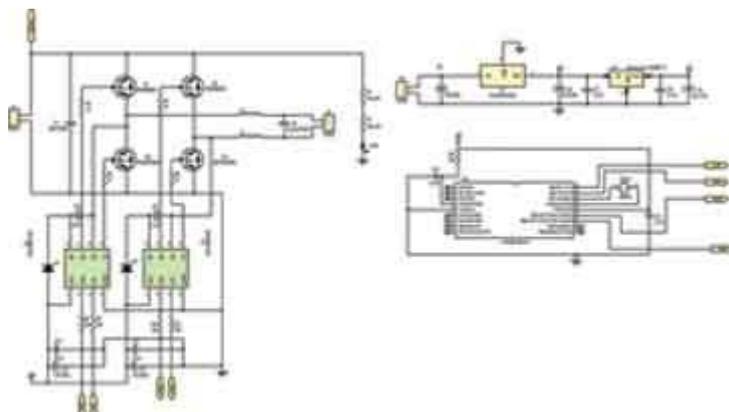


图 2 全桥功率逆变器电路

当我们细看高电压(600V)超高速沟道 IGBT 的开关性能，便会知道这些器件为 20kHz 的开关频率进行了优化。这使设计在相关的频率下能够保持最少的开关损耗，包括集电极到发射极的饱和电压 $V_{ce(on)}$ 及总开关能量 ETS。结果，总通态和开关功率损耗便可以维持在最低的水平。根据这一点，我们选择了超高速沟道 IGBT，例如，IRGB4062DPBF 作为高侧功率器件。这种超高速沟道 IGBT 与一个超高速软恢复二极管采用协同封装，进一步确保低开关耗损。

此外，这些 IGBT 不用要求短路额定值，因为当逆变器的输出出现短路时，输出电感器 L1 和 L2 会限制电流 di/dt ，从而给予控制器足够的时间做出适当的回应。还有，与同样尺寸的非短路额定 IGBT 比较，短路额定 IGBT 提供更高的 $V_{ce(on)}$ 和 ETS。由于拥有更高的 $V_{ce(on)}$ 和 ETS，短路额定 IGBT 会带来更高的功率损耗，使功率逆变器的效率降低。

再者，超高速沟道 IGBT 也提供方形反向偏压工作区、最高 175°C 结温，还可承受 4 倍的额定电流。为了要显示它们的耐用性，这些功率器件也经过 100% 钳位电感负载测试。

与高侧不同，通态耗损支配了低侧 IGBT。因为低侧晶体管的工作频率只有 60Hz，开关损耗对这些器件来说微不足道。标准速度平面 IGBT 是特别为低频率和较低通态耗损而设计。所以，随着低侧器件于 60Hz 进行开关，这些 IGBT 要通过采用标准速度平面 IGBT 来达到的最低功率耗损水平。因为这些器件的开关损耗非常少，标准速度平面 IGBT 的总耗散并没有受到其开关损耗所影响。基于这些考虑，标准速度 IGBT IRG4BC20SD 因此成为低功率器件的最好选择。一个第四代 IGBT 与超高速软恢复反向并联二极管协同封装，并且为最低饱和电压和低工作频率 (<1kHz) 进行优化。在 10A 下的典型 $V_{ce(on)}$ 为 1.4V。针对低正向降压及反向漏电流，跨越低侧 IGBT 的协同封装二极管已经优化了，以在续流和反向恢复期间把损耗降到最低。

逆变器效率

图 2 展示了系统层面的全桥功率逆变器电路。就如图中所示，H 桥的每一支管脚由高电流、高速栅极驱动器 IC，以及独立低和高侧参考输出通道所驱动。驱动器 IRS2106SPBF 的浮动通道容许自举电源为高侧功率电器件工作。因此，它免除了高侧驱动对隔离式电源的需求。这有助整体系统去改善逆变器的效率和减少零件数目。当电流续流到低侧 IGBT 协同封装二极管，这些驱动器的自举电容器会在每个开关周期 (50 μ s) 更新。

由于高侧 Q1 和 Q2 协同封装二极管并不受续流电流影响，同时低侧 Q3 及 Q4 拥有主要的通态耗损和非常少的开关耗损，整体系统损耗获得最小化，而系统效率就得到最大化。此外，因为在任何时间，开关都在对角器件配对 Q1 和 Q4，或者 Q2 和 Q3 上进行，所以排除了直通的可能性。同时，每个输出驱动器 IC 具备高脉冲电流缓冲级以最小化驱动器的直通。这个逆变器的另一个突出功能，是它以单一直流母线供电运作。因此，排除了负直流母线的需求。简单点来说，针对整体逆变器，以上这些安排全部都可以转化为更高的效率和更少的零件数目。更少的零件也表示设计可以占更少的空间，以及拥有更简短的物料清单。

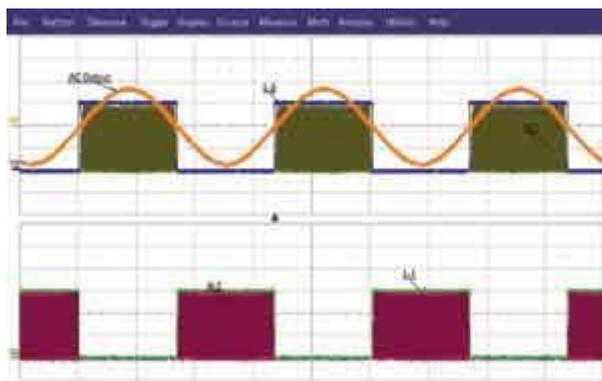


图3 电容器充电波形

在这个逆变器设计中，+20V 电源首先用来推动微型处理器，并且管理不同的电路。有关代码的实现，这个逆变器解决方案中采用的 8 位微型控制器 PIC18F1320 会为 IGBT 驱动器产生信号，由此最终提供用来驱动 IGBT 的信号。以专用先进高电压 IC 工艺过程 (G5 HVIC) 以及锁存免疫 CMOS 技术的栅极驱动器集成高电压转换和终端技术，使驱动器能够从微型控制器的低电压输入产生适当的栅极驱动信号。有关的逻辑输入与标准 CMOS 或 LSTTL 输出相容，逻辑电压可低至 3.3V。

超高速二极管 D1 和 D2 提供路径来把电容器 C2 及 C3 充电，并且确保高侧驱动器获得正确的动力。图 3 描绘出相关的输出波形。如图所示，在正输出半周期内，高侧 IGBT Q1 经过正弦 PWM 调制，但低侧 Q4 就保持开通状况。同样地，在负输出半周期内，高侧 Q2 经过正弦 PWM 调制，而低侧 Q3 则保持开通状况。这种开关技术在输出 LC 滤波器之后，于电容器 C4 的两端提供 60Hz 交流正弦波。

逆变器是为 500W 的输出而设计，测量所得的交流输出功率是 480.1W，功率损耗则是 14.4W。在 60Hz 的频率下，交流输出电压有 117.8V，输出电流是 4.074A。这个配置获得 97.09% 的效率。利用相似的配置，将逆变器改为针对 200W 输出，然后再重新测量转换效率。结果显示，在这个负载下，交流功率为 214W，功率损耗有 6.0W，而在 1.721A 的输出电流下，60Hz 输出电压为 124.6V。在这个功率额定值下，所得的转换效率为 97.28%。即使在较低一端的输出功率 (100W)，我们也看到相似的效率性能。

简单来说，通过把适当的高电压驱动器与优化了的低侧和高侧高电压 IGBT 结合，我们在这里提到的太阳能逆变器设计，能够在 100~500W 的功率输出范围内持续提供高转换效率性能。由于转换效率非常高，所以有关的低功率损耗并不会带来任何温度管理挑战。因此，在最高 500W 的输出功率下，高侧 IGBT (IRGB4062DPBF) 的结温大约 80°C，比最高的特定结温 175°C 要低于一半。同样地，在一样的功率水平下，低侧 IGBT (IRG4BC20SD-PBF) 显示 83°C 的结温。同时，当输出功率达到 200W 左右，温度还会变得更低。