

600W 高功率密度、高效率 DC/DC 的研制

李龙文 上海飞兆科技公司

电子设备中一个稳定可靠、小体积、高效率、低发热的电源始终都是电子业界追求的目标。然而,实现的方法、手段却各不相同。怎样实现高效率高功率密度的 DC/DC,业界几乎都认为必须提高开关频率才能实现。然而,提高开关频率却并不十分理想。一者频率升高后变压器磁芯的饱和磁密会降低,并不能使体积大幅度减下来。开关元件的开关损耗及驱动损耗大幅度上升使效率大大降低。就是采用所谓软开关电路拓扑也只能减少开关元件的开关损耗,而驱动损耗是降不下来的。而且工作费时、费力,效率的提升也有限。

我们开始设计一种新思路,即将工作频率限定在 250kHz。这样的适中频率,使变压器在磁密最佳值,功率密度最佳值达到最佳搭配。选择最能充分利用变压器及电感的磁性材料的电路拓扑,即全桥硬开关电路拓扑做此方案。

随着微电子技术的进步,将其技术如:完美晶格技术、亚微米光刻技术运用于功率 MOSFET 的设计和生后,生产同样耐压的器件,却可选用电阻率低得多的半导体材料,完美的外延层晶格很少的破损,造就了 MOSFET 导通电阻的新纪录。元胞尺寸的大幅减小又使它的开关速度达到了 20ns 的水平。完美的氧化层还大幅度地减小了 MOSFET 的栅电荷及栅源、栅漏输入电容。这样造出的新一代 MOSFET 在 50A80V 时,导通电阻仅有 10mΩ,开关速度为 20~30ns,驱动栅电荷仅 30nC 把如此优秀的器件用在全桥硬开关电路拓扑中实现了最完美的组合。实践中对比了一下全桥移相 ZVS 软开关电路拓扑。此项软开关技术虽然省去了开关损耗,但却增加了谐振电感的损耗。由于串入谐振电感导致的占空比丢失,使二次整流的损耗又增大了。由于谐振电感体积不算小,占用的空间还会降低功率密度。所以, MOSFET

性能的进步造就了电路拓扑的回潮。为了缩小体积, MOSFET 选择裸芯片贴装方案,其优点在于既缩小了占用的空间,又减小了功率元件的热阻,使其热量仅间隔一层氧化铝薄片就到达外壳,经散热器导出。这种作法对提高可靠性、增加 MTBF 至关重要,也是本项目提高功率密度的大手笔,将节省的空间用于放置体积加大的变压器和滤波电感。

为充分地利用变压器的绕组,在二次侧不采用中心抽头式而采用无抽头的绕组做倍流整流的电路方案。因此变压器初级、次级绕组及窗口空间做到最充分的利用,除去死区时间外变压器绕组总有满额电流流过。这样做即使频率不算,高变压器体积也不算太大。

输出整流部分则采用最新的 ZCS 同步整流技术。我们已经认同同步整流技术对 DC/DC 变换器效率的提高比软开关技术来得更为显著。但做此项技术时,却忽略了大功率同步整流的 MOSFET 在开关切换如此大的电流时其开关损耗也已经非常可观。为此设计出了软开关的同步整流技术,即此中的 ZCS 同步整流。实验结果此项技术比硬开关的同步整流提高约 2% 的效率。目前此技术已经在国外高档 DC/DC 中有所采用。它使 DC/DC 的总体效率水平从 90% 上升到了 93%~95%。软开关的效果在初级侧未发挥出的作用在二次侧得到了充电发挥。

同样,二次同步整流用 MOSFET 的选取仍旧至关重要。它的导通电阻,它的驱动栅电荷应该选择最优秀的,装置也采用直接贴芯片方式。电路拓扑定下来,就是选择控制方式。我们选择了二十一世纪才问世的控制 IC 及驱动 IC,还有 Vcc 供电 IC。并把它巧妙地组成一个 MCM 的综合体。此即新组合出的混合

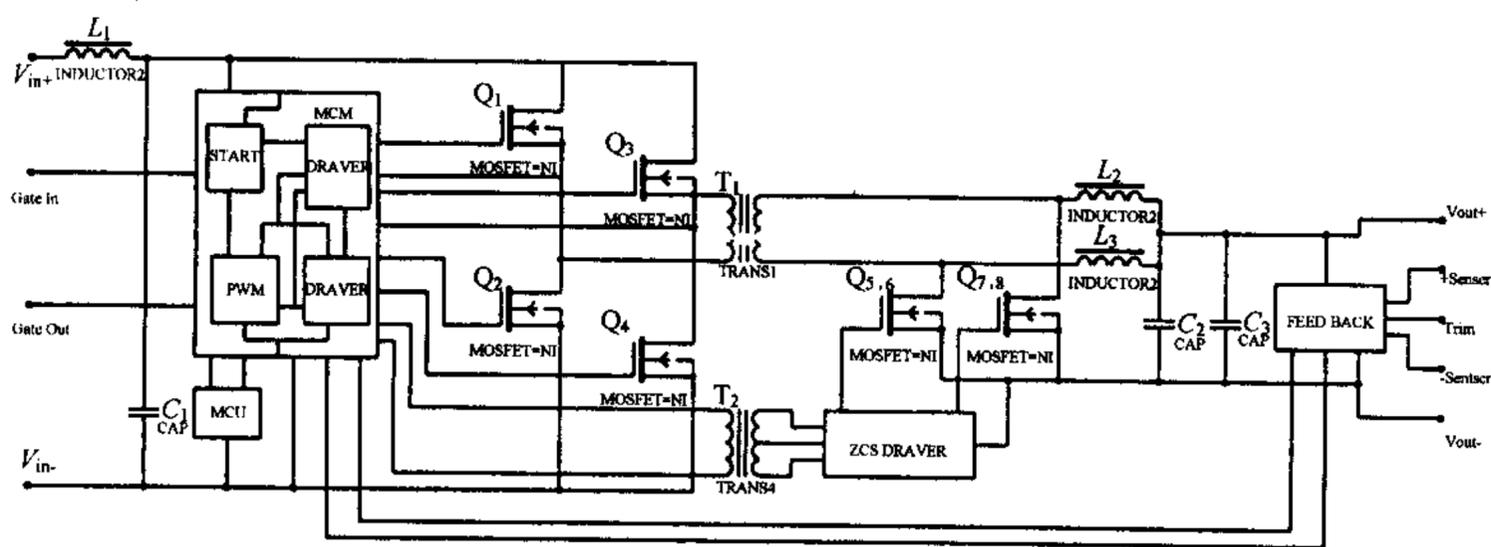


图 1 600W DC/DC 变换器原理图

集成 IC。外可直接接输入电源电压,给人电压后即给出全桥四个功率 MOSFET 的驱动信号。整个 MCM 的混合体体积不大,厚度很薄,仅为通用 IC 的两倍。将其放置在全桥 MOSFET 的上部空间,驱动信号直接接在 MOSFET 的栅极和源极上,此混合控制 IC 只占天不占地,又与 MOSFET 紧凑配合。由于内部组成的 IC 大部分为 BICMOS 电路静态功耗很小,基本损耗就是驱动全桥四颗 MOSFET 的损耗。二次同步整流的控制 IC 也放置于同步整流 MOSFET 的上面空间,形成一个有机配合。

控制电路中还增加了一点新的尝试,即在控制部分加入了

一个 SO-8 的小型 MCU。它是一个八位的微处理器,同时含有足够的 RAM 和 ROM。ROM 可事先写入所需程序。本项目中用它做了起动、关断、输入的过压、欠压保护。整个 DC/DC 的过热保护、输出过流保护、短路保护等。尚未让数字控制进入 PWM 的控制环,这样做并不复杂却使 DC/DC 向数字化控制迈出了第一步。

整个电路结构方框电路如图 1 所示。元件布局及外形结构如图 2 所示。

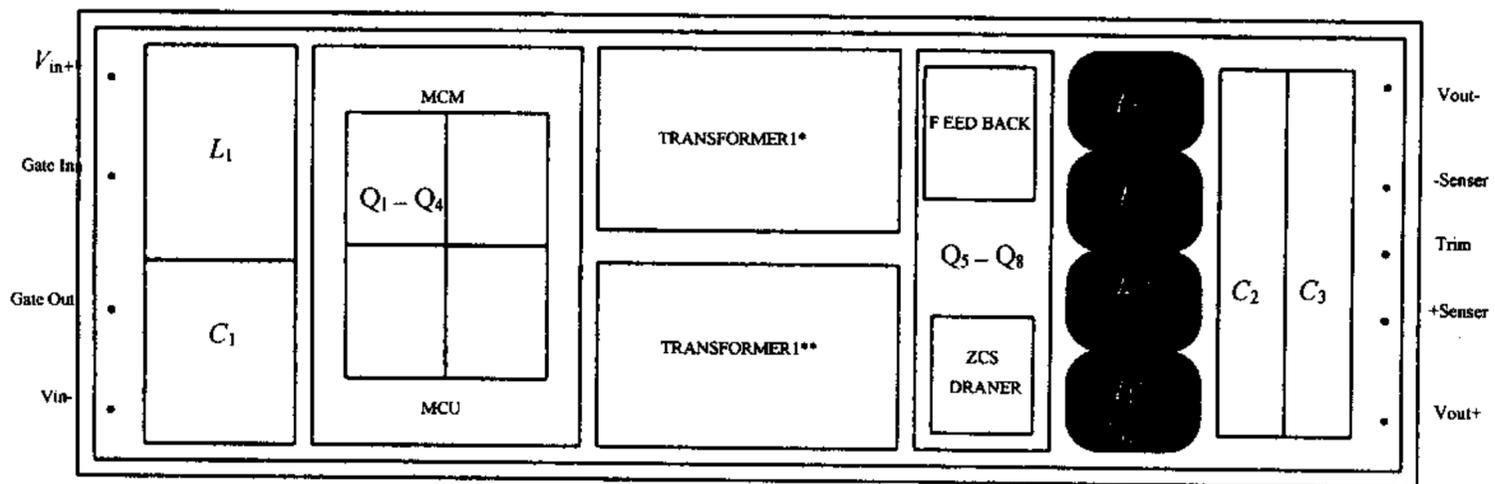


图 2 600W DC/DC 变换器结构图

外壳几何尺寸与 VICOR 第二代 MAX 兼容,尺寸完全相同。但外壳为无氧铜底板,可伐材料边框。铜底板减小了热阻,明显优于铝外壳。对于 48V 输入系列,输出功率为 600W;24V 输入系列功率为 500W。外壳几何尺寸为 $116 \times 4.5 \times 12.7\text{mm}^3$ (或 $4.53 \times 1.77 \times 0.5\text{in}^3$) 功率密度为 $600\text{W}/4\text{in}^3 = 150\text{W}/\text{in}^3$ 。转换效率对不同输出电压及不同输出功率时各不一样。

满载

半载

$V_o \geq 24\text{V} > 91\%$

$V_o \geq 24\text{V} > 92\%$

$V_o 12\text{V} \sim 18\text{V} > 93\%$

$V_o 12\text{V} \sim 18\text{V} > 94\%$

$V_o 3.3\text{V} \sim 5\text{V} > 91.5\% (500\text{W})$ $V_o 3.3\text{V} \sim 5\text{V} > 93\% (250\text{W})$

以上产品还能通过 $-40^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$ 的环境温度,条件是装配足够的散热板。

纵观我们的全部技术,应该讲核心的 PWM IC、MCU、高档 MOSFET、高档肖特基、磁材几乎都出自美国,我们若想赶上去,基础工业技术的努力不可少啊!

几点总结

1. 高技术含量的功率 MOSFET 对本项目至关重要。当其开关速度达到 30ns 以内时,可省去软开关技术,仅用硬开关电路拓扑。
2. 软开关的同步整流技术至关重要。目前 DC/DC 变换器输出电压却比较低,因此电流很大,此时选择 ZCS 技术至关重要,对效率的提升贡献很大。
3. 功率 MOSFET 及肖特基二极管在大功率输出时,采用芯片直接装配对降低热阻,提高输出功率,提高功率密度非常重要,可能成为可靠性过关的关键。它可大幅度缩小所占空间位置对提高功率密度缩小体积十分有利。
4. 铜底板外壳也是本项目能实现的重要一着,它确保了芯片的最高结温在安全可靠范围内防止半导体器件在高结温状态下的早期失效。
5. 磁性材料的充分合理使用也是做大功率及提高效率减小体积的一个重要步骤。今后磁材、变压器及电感将成为进一步提高效率,提高功率密度的技术突破口。