

基于 GaN 的高频 LLC 谐振变换器的设计考量

本文针对高频 LLC 谐振拓扑将氮化镓 (GaN) 功率器件与硅基超结 MOSFET (Si SJMOS) 和碳化硅 MOSFET (SiC MOS) 进行对比, 评估了 GaN 功率器件在性能上的优势。文章首先比较了实现高效率和高功率密度 LLC 谐振变换器的关键器件参数。然后, 对基于 GaN, Si 和 SiC 的 3KW LLC 的损耗和效率进行分析, 最后定量得出结论: 基于 GaN 的 LLC 具有明显性能优势, GaN 功率器件对于实现高密度和高效率 LLC 谐振变换器具有重要的价值。

作者: 加拿大 GaN Systems, 刘学超

介绍

伴随着更高功率密度, 更小尺寸和更高效率的明显趋势, 高频 LLC 谐振变换器是工业隔离 DC / DC 拓扑的极佳解决方案, 例如笔记本适配器 (> 75W), 1KW-3KW 数据中心电源和车载充电器 (OBC) 等。图 1 以半桥 LLC 谐振变换器拓扑电路为例, 其开关频率分别为 100KHz 和 500KHz。在 500KHz 频率条件下, 无源谐振元件 (变压器, 谐振电感器和谐振电容器) 的尺寸大大减小, 提高了功率密度。然而在高频条件下, 需要考虑功率器件 (Q1 和 Q2) 的选型, 以权衡效率和功率密度。当前, GaN 功率器件技术已在市场上确立了成熟的地位和强劲的未来发展势头, 尽管在硬开关应用中使用 GaN 可以显著提高效率, 但在软开关拓扑中通常研究对比较少, 文章将对基于 GaN 功率器件的 LLC 谐振软开关变换器进行研究, 表明在软开关拓扑中 (例如 LLC 拓扑), GaN 功率器件同样具有更高效率和更高功率密度的显著优势。文章讨论了 GaN、Si SJMOS 和 SiC MOS 三种主要功率器件, 进行了器件选型和比较分析。考量了诸如时间相关的输出有效电容 $C_{o(tr)}$ 和关断能量 E_{off} 等重要参数, 这些参数将会影响 LLC 变换器的高性能实现。文章还对基于 GaN, Si 和 SiC MOS 的 3KW 48V 输出 LLC 变换器进行了研究, 以进行效率和功率密度对比。

功率器件选型

由于工作在谐振状态, LLC 拓扑可实现整个工作范围内的软开关导通, 以达到降低器件开关损耗和磁件损耗的目的, 具有高效和低电磁干扰等性能优势。在图 2 中, LLC 初级侧电流 i_{Lr} 由次级侧折算电流和励磁电流 i_{Lm} 的叠加组成。其中, 励磁电流



图 1: 工作在 100KHz 或 500KHz 频率下的半桥 LLC 谐振变换器

i_{Lm} 本身不会传递能量至输出, 其作用是利用励磁能量释放功率器件寄生输出电容能量, 从而实现器件的零电压导通 (ZVS), 达到零损耗开通的目的。一方面, 为了实现 ZVS 导通, 应该在每个死区时间内使用足够的励磁电流将功率器件的寄生输出电容完

全放电, 实现 ZVS。另一方面, 在死区时间内, 励磁电流将在初级线圈产生额外的循环通态损耗。因此, 最小化励磁电流以满足 ZVS 条件是优化 LLC 变换器设计的重要目标。

公式 (1) 是半桥 LLC 拓扑实现 ZVS 条件的最小死区时间。其中, L_m 是主变压器的励磁电感, f_s 是开关频率。参数 $C_{o(tr)}$ 为漏源极电压充放电时间等效的输出电容, 它是高效和高密度 LLC 变换器的关键参数。在给定的漏源极的放电时间和相同死区时间下, $C_{o(tr)}$ 的值越低, 实现 ZVS 条件所需的励磁电流就越少, 可设计的励磁电感值 L_m 就越高, 从而降低了初级侧的循环通态损耗。同时, 对于给定的励磁电感 L_m 和死区时间 t_{dead} , 电容值 $C_{o(tr)}$ 越小, 在满足 ZVS 前提下可以采用更高的开关频率 f_s 以实现更高的功率密度。

$$t_{deadmin} = 16 \cdot C_{o(tr)} \cdot L_m \cdot f_s \quad (1)$$

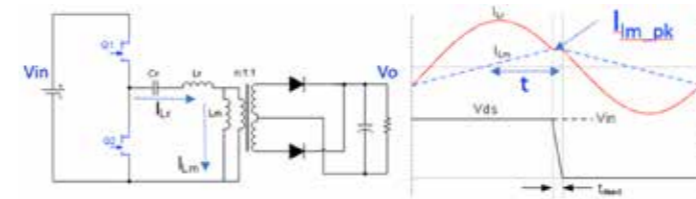


图 2: 半桥 LLC 谐振电路的原边电流与电压

等效输出电容 $C_{o(tr)}$ 可以从输出电荷 Q_{oss} 和输出电容 C_{oss} 推导得到。其关系公式为 $Q_{oss} = \int_0^{V_{dr}} C_{oss}(v) dv$ 和 $C_{o(tr)} = Q_{oss}/V$ 。图 3 为输出电荷 Q_{oss} 与漏源极电压 V_{ds} 关系曲线, 可以看到, 在 400V 电压下, Si SJMOS 的 $C_{o(tr)}$ 通常比 GaN 高 10 倍, 而 SiC 的 $C_{o(tr)}$ 比 GaN 高 50%。因此, GaN 器件较小 $C_{o(tr)}$ 电容值将为 LLC 变换器更高效和更高功率密度带来可能。

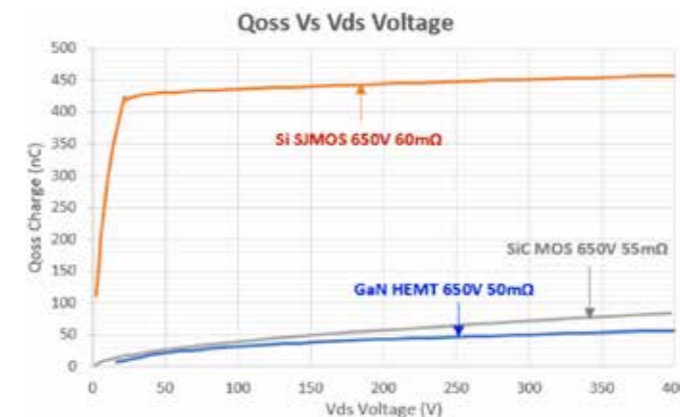


图 3: 输出电荷 Q_{oss} 和漏源极电压 V_{ds} 关系曲线比较 (GaN, Si 和 SiC)

LLC 变换器的另一个重要参数是栅漏极电荷 Q_{gd} 和关断时间 t_{off} 。其中 Q_{gd} 描述了栅极到漏极开关所需的电荷, Q_{gd} 和 t_{off}

参数值表明了关断能力和相关损耗, 从而影响了最大工作频率和效率。关断时间 t_{off} 通常并未在数据手册中显示, 但是可以根据参考文献 [1] 在给定的开关电压和电流条件下推导得出。

对于基于 MOSFET (Si 和 SiC) 来说, LLC 拓扑的另一个重要挑战是寄生体二极管的不完全反向恢复。MOSFET 的体二极管不完全反向恢复将引起 LLC 在过载或启动等容性工作范围下潜在的系统失效问题 [2]。LLC 拓扑在非稳态下 (过载或启动等) MOSFET 体二极管的反向恢复电荷 Q_{rr} 将产生高 dv/dt , 并带来较大的直通电流流经桥式开关器件, 将导致 MOSFET 击穿风险。因此, Q_{rr} 是验证 LLC 硬开关工作模式失效风险的关键参数, Q_{rr} 越小越能避免 LLC 硬开关工作模式失效的产生。

表 1 总结了具有 GaN, Si 和 SiC 不同物理材料的三个功率器件的参数。其中 Si SJ MOS 选择了最新的具有快速体二极管的 Si 基 MOSFET。GaN 和 SiC 是最新一代的宽禁带功率器件, 更适用于高效率和高密度功率变换。如表所示, 与 Si 和 SiC 相比, 在近似相同导通电阻 $R_{DS(on)}$ 下, GaN 器件在 LLC 拓扑关键参数方面具有较大的优势, $C_{o(tr)}$, Q_{gd} , t_{off} 和 Q_g 的值越低, 针对效率和功率密度设计的 LLC 变换器性能越好。另外, GaN 功率器件是在 AlGaIn / GaN 异质结上形成的横向二维电子气 (2DEG) 通道, 其不具有寄生体二极管。没有体二极管意味着没有反向恢复电荷 Q_{rr} , 因此, 采用 GaN 器件避免了存在于 MOSFET 的体二极管带来的 LLC 硬开关工作模式的失效风险。

参数	器件材料			GaN 的优势	
	氮化镓 MOSFET	碳化硅 MOSFET	硅基 MOSFET		
截止电压	V_{ds} V	650	600	650	
通态电阻	$R_{DS(on)}$ mΩ	50	48	55	近似的通态电阻 $R_{DS(on)}$
时间相关等效输出电容	$C_{o(tr)}$ pF	142	1171	210	较短死区时间, 低寄生电容通态损耗
栅漏极电荷	Q_{gd} nC	1.8	28	27	低关断损耗
关断时间 @ 5A 400V	t_{off} ns	2.52	15.1	11.0	低关断损耗
总栅极电荷	Q_g nC	5.8	79	73	低开关和驱动损耗
反向恢复电荷	Q_{rr} nC	0	720	85	无硬开关过程失效风险

表 1: LLC 谐振变换器器件参数比较

工作模式和损耗

图 4 给出了半桥 LLC 谐振变换器的半个稳态周期工作模式, 以下是主要的五个状态和相应的损耗分析:

1. 在状态 1 中, 当上管驱动信号 V_{GSH} 变为低电平时, 在死区时间内, 初级侧励磁电流 i_{Lm} 开始使下管的输出电容放电。

2. 在状态 2 中, 寄生输出电容完全放电, 并且 GaN 器件通过从源极到漏极的 2DEG 通道工作于第三象限。而 Si SJMOS 和 SiC MOS 具有寄生体二极管, 体二极管将在栅极通道关闭的情况下将电流从源极续流至漏极。在该状态 2 下, 由于存在励磁电流, 因此在初级侧存在循环通态损耗。这种损耗在很大程度上取决于 $C_{o(tr)}$ 电容值。较低的 $C_{o(tr)}$ 会缩短死区时间和较低的励磁电流, 从而导致较低的循环通态损耗。

3. 在状态 3 中，当驱动信号 VGSL 为高时，下管实现 ZVS，没有开通损耗。

4. 在状态 4 中，下管驱动为高，正向电流导通。在此状态下存在一个导通损耗，与器件的导通电阻 RDS(on) 有关。

5. 在状态 5 中，驱动信号 VGSL 变为低电平，并且通过硬开关关闭了器件的沟道。由于励磁峰值电流 I_{lm_pk} 的存在，因此存在电流和电压交叠开关损耗。这种损耗取决于器件的特性，即栅漏极电荷 Qgd 和关断时间 toff。

图 4 中未提及的另一个损耗是栅极驱动损耗，它与器件的栅极电荷 Qg 有关。较低的 Qg 导致较低的栅极驱动损耗，对于高开关频率，栅极驱动带来的损耗将不可被忽略。

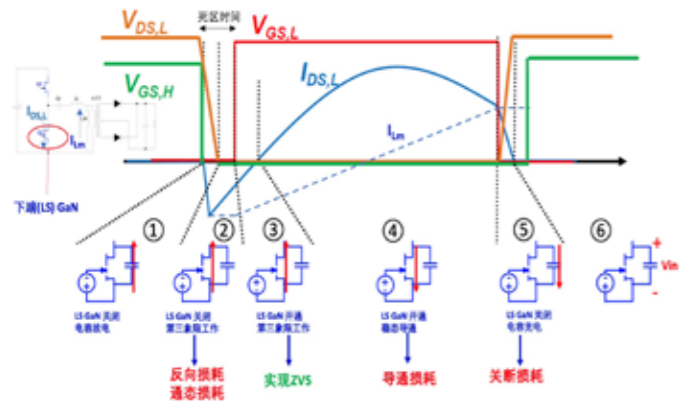


图 4: 稳态工作模式及其相关损耗

3KW LLC 谐振变换器

根据上述参数和损耗分析，采用不同的功率器件 (GaN, Si 和 SiC) 和不同的开关频率进行比较，以评估效率和功率密度的性能。选择表 1 中的三种类型功率器件，采用两颗并联方式设计了一个具有 48V 输出的 3KW 半桥 LLC 谐振变换器，并进行了两种情况的比较：第一种是所有三种功率器件均以 500KHz 谐振频率工作；第二个是 500KHz GaN 基 LLC 和 100KHz Si 基 LLC。

图 5 给出了 3KW 半桥 LLC 的效率和损耗数据，其中所有功率开关器件均工作在 500KHz 频率。在相同 500KHz 频率下，其他元件（如变压器，电感器和 SR 功率器件）的损耗相同，关键的损耗差异来自初级侧功率器件。可以看到，尽管 LLC 变换器可以实现 ZVS 导通，但由于初级绕组上励磁峰值电流的存在，器件关断损耗仍然存在，尤其是当开关频率增加到 500KHz 时，这些关断损耗不可忽略。与 GaN 相比，Si 和 SiC 的主要损耗是关断损耗，Si 的关断损耗是 GaN 的 6 倍，而 SiC 的关断损耗是 GaN 的 4 倍。此外，与 Si 和 SiC 相比，基于 GaN 的 LLC 的驱动损耗要小得多。总体结果表明，GaN 器件的总损耗比 SiC 器件低约 20%，比 Si 器件低 37%。所以基于 GaN 的 LLC 在相同频率下实现了更高效率，效率的提升有利于其满足最新工业能耗要求（例如，用于数据中心服务器电源的 80Plus 钛金标准）。

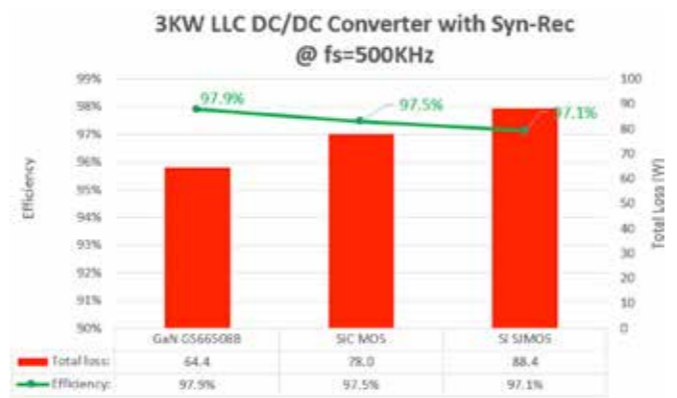
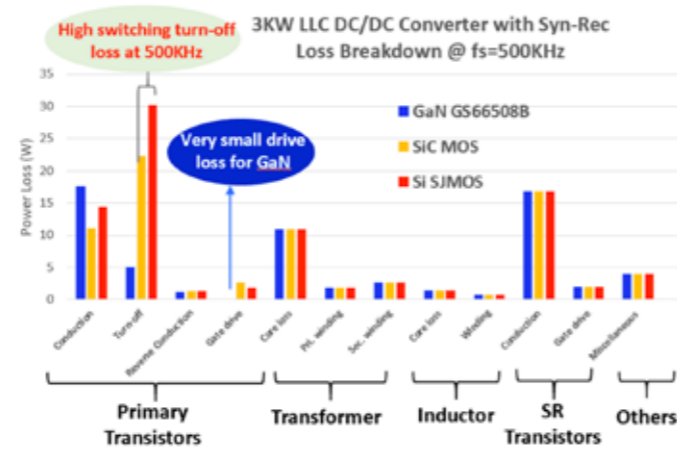
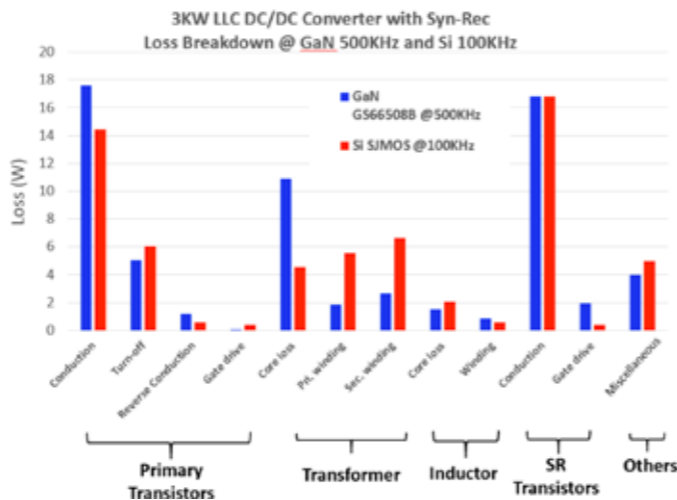


图 5: 3KW 500KHz LLC 谐振变换器在使用 GaN, Si 和 SiC 下的损耗和效率

图 6 给出了 500kHz GaN 基 LLC 和 100kHz Si 基 LLC 的比较。该示例设定满载效率均为 97.9%，以研究功率密度的不同。如图所示，在 500KHz 的 GaN 基 LLC 的情况下，与 Si 基 LLC 相比，GaN 基 LLC 谐振无源器件的体积可以相对减少 64%。总体而言，对于 3KW LLC 变换器，在相同效率下，GaN 基 500KHz LLC 解决方案的功率密度比 Si 基 100KHz LLC 解决方案高 1.7 倍。



参数	GaN @500KHz	Si @100KHz
最高效率	97.9%	97.9%
谐振参数	Lm=10uH, Lr=2uH, Cr=50nF	Lm=50uH, Lr=9uH, Cr=280nF
变压器; Tr 尺寸	PQ3535 17300mm ³	PQ5050 37200mm ³
电感; Lr 尺寸	PQ2016 8T 2310mm ³	PQ3535 12T 17300mm ³
电容; Cr 尺寸	9x5.6nF 32mm ³	6x47nF 82mm ³
谐振无源器件总体积	19642mm ³	54582mm ³
谐振参数标准化体积差异	1x	2.8x
DC/DC功率密度标准化差异	1.7x	1x

图 6: 3KW 500KHz GaN 基 LLC 和 100KHz Si 基 LLC 在效率和损耗的对比

结论

LLC 谐振变换器的案例研究表明，GaN 功率器件具有明显的性能优势。从效率和功率密度的角度来看，具有最低 Co(tr)，Qgd，toff 和 Qg 的 GaN 功率器件是 LLC 拓扑的最佳选择。此外，Qrr 为零的 GaN 器件具有更高可靠性，避免了 LLC 硬开关工作模式的失效风险。总之，与用于 LLC 拓扑应用的 Si 和 SiC 功率 MOSFET 器件相比，GaN 功率器件在效率和功率密度方面都具有更高的价值。

参考文献

- [1] B. Jayant Baliga's, the book "Fundamentals of Power Semiconductor Devices", on page 440~442.
- [2] Clark Person, the Master Thesis of the Virginia Polytechnic Institute and State University "Selection of Primary Side Devices for LLC Resonant Converters", April 2008.

关于作者

刘学超 (Jimmy Liu) 是 GaN Systems Inc. 的技术市场总监，拥有电力电子工学博士学位，并且在宽禁带半导体器件的应用和可再生能源系统设计方面拥有丰富的经验

www.gansystems.com