

Travis Ma, Strong Zhang, Will Tai

Sales and Marketing / SZ China

摘要

软开关技术 (ZVS 和 ZCS) 广泛应用于多种功率电源拓扑, 成为降低损耗, 提高效率和优化 EMI 的关键。传统的软开关通常使用固定死区时间配置, 当死区时间与软开关时间不完全匹配时, 会导致额外的第三象限损耗, 这在反向导通电压较高的 GaN 器件中尤为明显。TI 的新一代 GaN 器件提供了零电压检测 (ZVD) 功能, ZVD 信号可作为反馈量实现更优化的死区时间调节, 能够降低第三象限死区时间损耗。本应用手册将详细介绍 TI GAN ZVD 的特性, 并以 LLC 拓扑为例, 通过仿真和实验验证 ZVD 技术在系统应用中的优势。

内容

1 引言.....	2
1.1 软开关基本原理.....	2
1.2 软开关死区时间损耗.....	2
1.3 GaN 应用的挑战.....	4
2 基于 ZVD 的自适应死区时间控制.....	5
2.1 TI GaN ZVD 功能.....	5
2.2 LLC 原边自适应死区时间控制.....	6
2.3 LLC 副边自适应死区时间控制.....	7
3 PLECS 仿真验证.....	9
4 总结.....	13
5 参考文献.....	13

插图清单

图 1-1. LLC 原边 ZVS 过程.....	2
图 1-2. LLC 原边死区时间损耗.....	3
图 1-3. LLC 副边死区时间损耗 (重载)	3
图 1-4. GaN 器件在第三象限的简化行为.....	4
图 2-1. LMG3526 零电压检测 (ZVD) 方框图.....	5
图 2-2. LMG3526 零电压检测 (ZVD) 时序图.....	6
图 2-3. 基于 ZVD 信号逐周期调整原边死区时间.....	7
图 2-4. 过短的副边同步整流死区导致出现电流尖峰.....	8
图 3-1. 仿真验证电路拓扑图和关键参数.....	9
图 3-2. LMG3526 ZVD 功能 PLECS 建模.....	9
图 3-3. 自适应死区时间控制器 PLECS 建模.....	9
图 3-4. 原边稳态仿真结果.....	10
图 3-5. 副边 BCM 稳态仿真结果.....	11
图 3-6. 副边 DCM 稳态仿真结果.....	11

表格清单

表 3-1. 不同仿真工况下的原副边第三象限导通损耗.....	12
---------------------------------	----

1 引言

1.1 软开关基本原理

由于内部寄生影响，MOSFET 需要一定的时间才能完全打开和关断。当发生硬开关 (Hard Switching) 时，MOSFET 开通电流上升和电压下降会产生交叠，带来瞬时开关损耗。此外，硬开关时快速的电压变化和电流变化会产生高频噪声，带来严重的 EMI 问题。为了解决上述缺陷，一些功率变换器会通过特定的设计手段，让 MOSFET 工作在零电压开通 (ZVS) 或零电流关断 (ZCS) 的软开关工作状态。

以 LLC 为例。在 LLC 的工作频率范围内，谐振腔相对原边呈感性负载，原边电流滞后于电压。在原边所有开关管均关闭的死区时间内，环流电流给 MOSFET 结电容 (Coss) 的充放电操作，可以使 MOSFET 电压在下次开启之前下落至 0V，实现 ZVS。

图 1-1 详细阐述了 LLC 原边 ZVS 过程。子图 (a) 展示了死区时间内开关管的电压电流波形。子图 (b) 展示了死区时间内谐振电感电流 ILR 在原边内部的环流路径。为简便起见，图中只画出了全桥四个 MOSFET 的 Coss 电容和体二极管。当 Qp1,3 关闭，VHB1 上的电压自初始值 VS 逐渐降低至 0，同时 VHB2 上的电压自 0V 逐渐升高至 VS。注意，图中 IDS 定义为 MOS 漏源级端口电流，是沟道电流、体二极管电流和 Coss 电流之和。

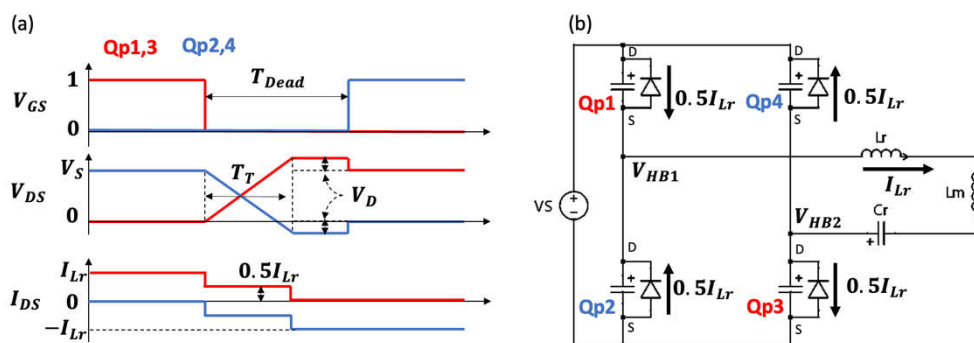


图 1-1. LLC 原边 ZVS 过程

完成 Coss 充放电所需的总时间 TT 为：

$$T_T = 2C_{OSS} \frac{V_S}{I_r} \quad (1)$$

在 $t = T_T$ 后，结电容电荷完成转换，VHB1 和 VHB2 都由 Qp2 和 Qp4 的体二极管钳位在 -VD 和 $V_S + V_D$ 处 (VD 为体二极管导通压降)，直到开关管再次打开。LLC 原边 ZVS 的充分必要条件是：

1. MOSFET 死区时间 TD 需大于 TZ，以保证结电容电荷完全转移。
2. 桥臂电流需滞后于电压，且在死区时间内不能换向。

关于 LLC 的副边 ZCS，根据其电路的特性，副边电流在重载时处于临界导通模式 (BCM)，中轻载时处于断续导通模式 (DCM)，因此在整流 MOSFET 开启和关断时电流均接近 0 或等于 0，实现了零电流开通和零电流关断 (ZCS)。

1.2 软开关死区时间损耗

软开关技术虽然能大大避免硬开关所带来的交叠开关损耗，但由于 MOSFET 反向导通压降的存在，会在死区时间内引入一定的反向导通损耗。以 LLC 为例，原边 ZVS 死区时间内的损耗原理如 图 1-2 所示：

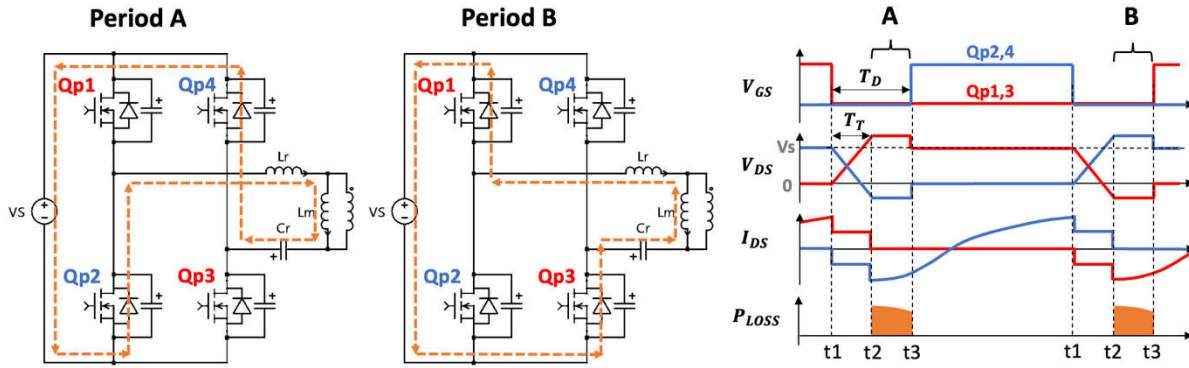


图 1-2. LLC 原边死区时间损耗

在 t_1 时刻 A 桥臂 (Qp1, 3) 开关管关闭, 环路剩余电流流经开关管 C_{oss} , V_{ds} 电压进入换向状态。 t_2 时刻所有开关管 V_{ds} 完成换向, C_{oss} 电压被钳位, 但由于 B 桥臂 (Qp2, 4) 上未开通, 因此环路剩余电流经体二极管继续流动, 直到 t_3 时刻 B 桥臂开通为止。因此在 t_2 - t_3 区间内, 会产生因体二极管导通所带来的损耗。这一损耗可以通过公式 2 估算:

$$P_{DT_pri} = 2 \cdot V_D \cdot I_{Lr} \cdot (T_D - T_T) \cdot f_{SW} \quad (2)$$

其中 V_D 为 MOSFET 体二极管压降, I_{Lr} 为串联谐振电感电流, T_D 为死区时间, T_T 为公式 (1) 中计算的转换时间, f_{SW} 为开关频率。在 LLC 拓扑中, 死区时间内的 I_{Lr} 可以通过开关频率和励磁电感值计算。

LLC 副边 ZCS 死区时间内的损耗原理如图 1-3 所示:

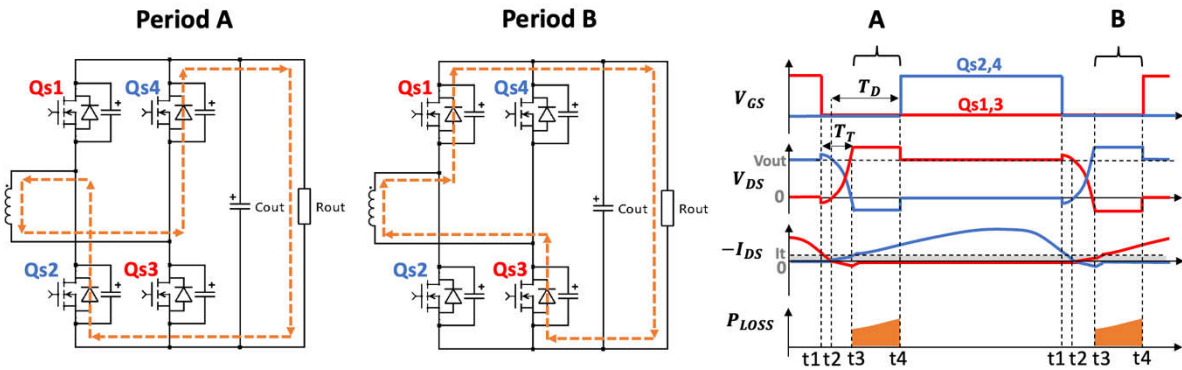


图 1-3. LLC 副边死区时间损耗 (重载)

图 1-3 中的示例采用电流控制的副边同步整流策略。在 t_1 时刻, 同步整流 A 桥臂 (Qs1, 3) 电流下降至同步整流阈值 I_t 以下, 因此 A 桥臂关断。 t_2 是真正的 B 桥臂电流过零点。在 t_1 - t_3 区间内, 副边开关管 C_{oss} 为 A 桥臂提供了低阻抗泄流路径, 因此在这一时间内所有开关管 V_{ds} 发生换向, 直到 t_3 时刻开关管电压被钳位, B 桥臂 (Qs2, 4) 电流由经过 B 桥臂体二极管回流。 t_3 至 t_4 时间段内, 副边会产生第三象限死区时间损耗, 可以通过公式 3 估算:

$$P_{DT_sec} = 2 \cdot V_D \cdot I_{TR} \cdot (T_D - T_T) \cdot f_{SW} \quad (3)$$

其中 I_{TR} 为副边电流, 该电流大小与负载相关, T_T 为副边 C_{oss} 换向所需的转换时间。为简化计算, 公式 3 忽略了 t_1 - t_2 时间段的影响。此外需要注意的是, 在 DCM 模式下, B 桥臂电流过零点 t_2 会非常接近 t_3 , 此时的损耗可以通过公式 4 近似估算:

$$P_{DT_sec} = 2 \cdot V_D \cdot I_{TR} \cdot T_D \cdot f_{SW} \quad (4)$$

在相同的死区时间和开关频率条件下，LLC 的原边死区时间损耗与负载大小无关，副边死区时间损耗一般随负载变大而增加。因此在轻载条件下，原边死区时间损耗会成为不可忽略的因素。

1.3 GaN 应用的挑战

在电源拓扑中使用 GAN 技术有助于进一步提高系统功率密度和效率。GaN 器件的结电容比 Si MOSFET 低得多，可以以更低的死区时间要求完成软开关。GaN 还具有低关断损耗，适用于 LLC 和移相全桥 (PSFB) 等具有原边零电压开通 ZVS 的拓扑，能够进一步减小硬关断对效率的不利影响。

GaN 器件应用的一个挑战来源于其独特的第三象限特性。根据之前的分析，死区时间损耗与器件的反向导通电压有关。对于 Si MOSFET，该电压等于体二极管的压降，该值一般在 1V 以内。而 GaN 器件的反向导通电压会显著高于 Si MOSFET，具体取决于第三象限特性。

GaN 器件的反向导通电压可通过公式 5 描述：

$$V_{SD} \approx (V_{th} - V_{gs}) + I_{SD} \cdot R_{REV} \quad (5)$$

其中 V_{th} 为阈值电压。作为参考，650V GaN 的典型值阈值电压约为 1.7V。 R_{REV} 为第三象限等效导通电阻。图 1-4 描述了 GaN 器件在第三象限的简化行为。

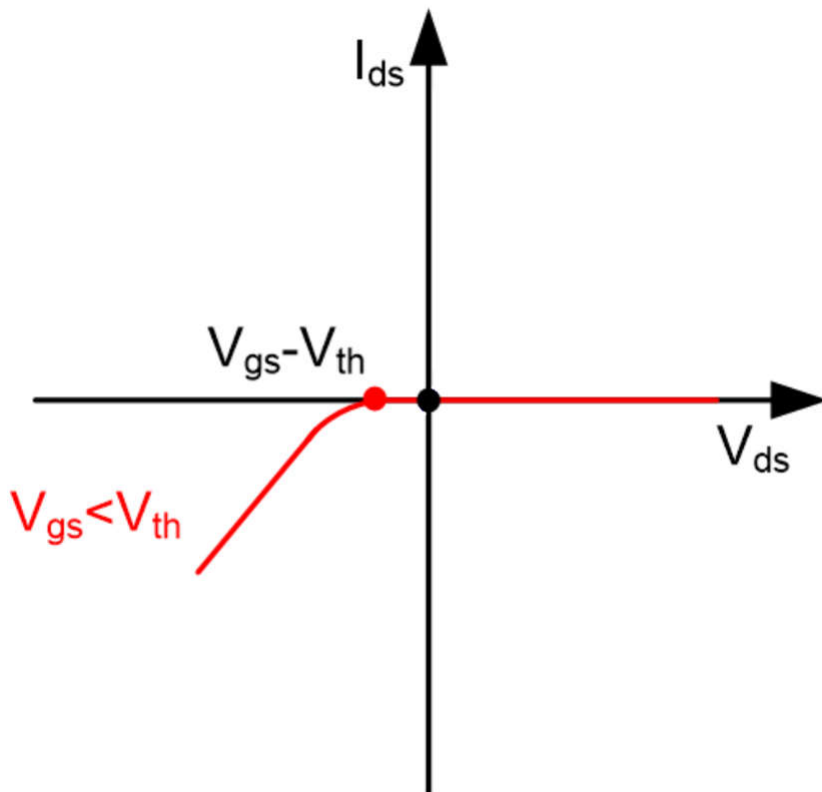


图 1-4. GaN 器件在第三象限的简化行为

可见，GaN 在第三象限开通负向电压需要高于 $V_{gs} - V_{th}$ 。在实际应用中通常采用负偏置栅极电压来避免噪声引发的误开通。例如栅极偏置为 -1.5V 的情况下，反向电压将从 3.2V 开始，并随着负载电流增加而进一步增大。

由于 GaN 相比 Si MOSFET 具有更大的反向导通压降，对于大功率电源系统，如不对死区时间进行优化调整，原副边的死区时间损耗之和可能会高达数十瓦量级，这会对系统的整体效率产生非常不利的影响。

2 基于 ZVD 的自适应死区时间控制

2.1 TI GaN ZVD 功能

一些电源产品会使用自适应死区补偿来减小 GaN 过高的反向导通压降带来的死区时间损耗，通常有如下方法：

1. 电压检测法：测量桥臂电压或单管 VDS，间接检测 FET Coss 充放电状态，在达到特定阈值后，认为软开关完成。这种方式最为直接，精度最高，但需要额外的运放或比较器电路，抗干扰能力也较差。
2. 电流检测法：测量谐振腔电流，通过公式或查表法，计算此时的理论死区时间。这种方式是间接判断软开关，精度有限，在实际使用中要留够一定余量。

TI 新一代 GaN 产品提供了零电压检测 (ZVD) 功能，该功能提供了一个 ZVD 数字信号，能够指示 GaN 在开关周期中是否实现 ZVS。可以基于 ZVD 功能设计自适应死区时间控制算法，将死区时间损耗降低至合理范围内，有助于简化系统自适应死区时间补偿设计。

以 LMG3526 为例，其 ZVD 原理如 图 2-1 所示。当输入信号 (IN) 变为高电平时，内部逻辑会检查器件是否在该开关周期中实现了 ZVS。一旦识别了特定条件的 ZVS 事件，在 TDL_ZVD 的延迟时间之后，将从 ZVD 引脚发出一个宽度为 TWD_ZVD 的 ZVD 信号脉冲。

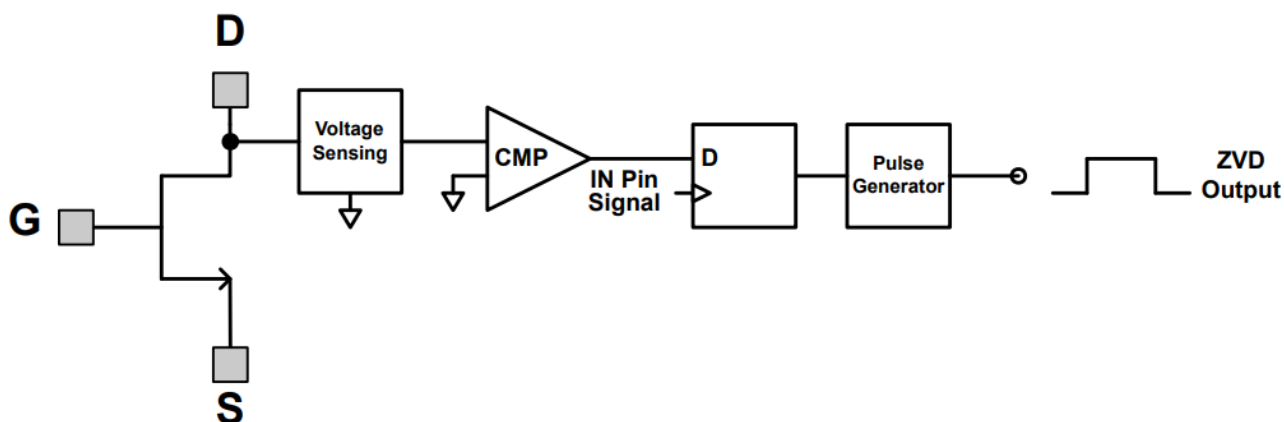


图 2-1. LMG3526 零电压检测 (ZVD) 方框图

需要注意的是，并不是每次 ZVS 都会触发 ZVD，ZVD 信号触发需要满足一定的第三象限导通时间 (T3rd_ZVD)。若 ZVS 时刻 IDS 电流刚刚过零，未进入第三象限导通或进入第三象限导通的时间不足，则不会触发 ZVD 信号。

图 2-2 展示了 LMG3526 的 ZVD 时序图。更详细地解释了 ZVD 信号的触发条件。

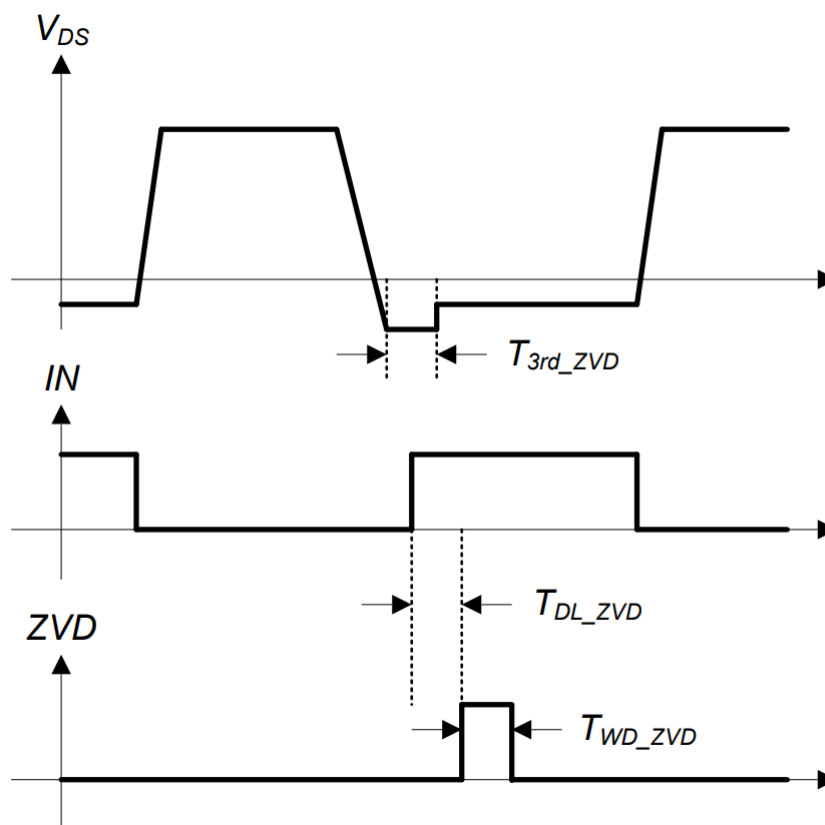


图 2-2. LMG3526 零电压检测 (ZVD) 时序图

图中 T_{3rd_ZVD} 为最小第三象限导通时间，若第三象限导通时间低于该值，器件将无法检测到 ZVD。 T_{DL_ZVD} 为 LMG3526 输入引脚 (IN) 上升沿与 ZVD 信号输出上升沿的延迟。 T_{WD_ZVD} 为 ZVD 信号的保持时间。输入引脚信号变为高电平时，逻辑电路会检查器件 V_{DS} 是否已达到 0V 以下，以便确定器件是否在该开关周期中实现了零电压开关。一旦识别了 ZVS，在 T_{DL_ZVD} 的延迟时间之后，将从 ZVD 引脚发出一个宽度为 T_{WD_ZVD} 的脉冲输出。

需要注意的是，IN 上升沿与内部 GaN FET 栅极电压上升沿还存在一个开通延迟 ($t_d(ON)$)，由于 $t_d(ON)$ 的存在，图 2-2 内 V_{DS} 结束第三象限导通的时刻相比 IN 上升沿更晚发生。

2.2 LLC 原边自适应死区时间控制

我们希望设计一种自适应死区时间算法，在避免硬开关前提下，尽可能缩短第三象限导通时间。利用 TI GaN ZVD 信号结合一种简单的控制机制可以实现上述要求。当开关周期出现 ZVD 信号，说明 GaN 第三象限导通时间过长，需要在下一个控制周期减小死区时间；当开关周期未出现 ZVD 信号，说明 GaN 反向导通时间过短，或丢失 ZVS (non-ZVS)，需要在下一个控制周期增大死区时间。该策略的流程图如 图 2-3 所示。

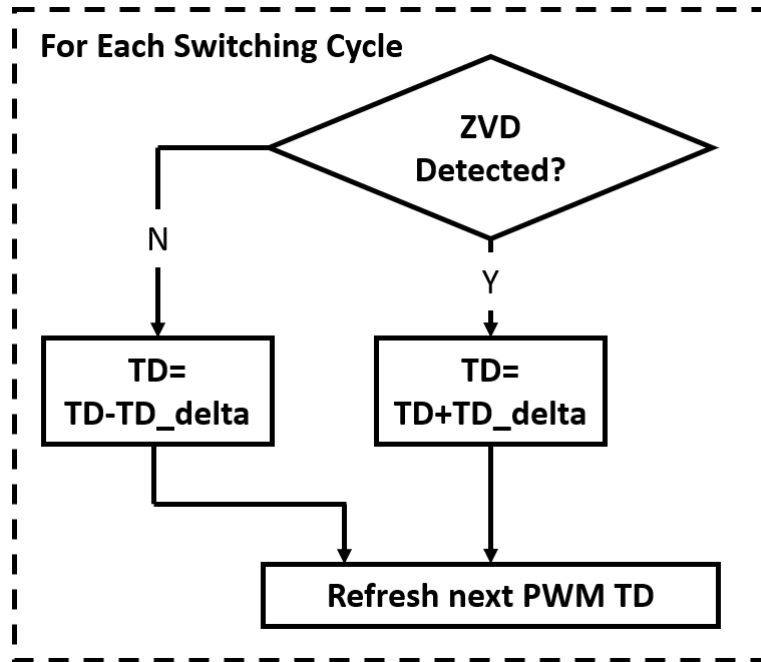


图 2-3. 基于 ZVD 信号逐周期调整原边死区时间

这一控制方法最终会将死区时间收敛至 $TT + T3rd_ZVD$ 附近，而不是 TT 。因为 $T3rd_ZVD$ 的存在，当未出现 ZVD 信号时，GaN 不一定真的处于 non-ZVS 状态，这给设计带来了一定裕量，但也引入了一个无法消除的最小死区时间损耗。在实际应用中，根据 LLC 原边的对称性，四个原边开关管仅有一个需要 ZVD 监控。剩余三个开关管的死区可以进一步缩短（通过固定的补偿值消除 $T3rd_ZVD$ 的影响）。因此理论上，LLC 原边可以实现三个开关管的完全零死区时间损耗（ $TD = TT$ ），与一个开关管的最小化死区时间损耗（ $TD = TT + T3rd_ZVD$ ）。

2.3 LLC 副边自适应死区时间控制

LLC 副边自适应死区时间控制策略与原边类似。1.2 节中讨论了电流型同步整流策略下的死区时间损耗，副边死区时间定义为副边相电流过零时刻与同步整流管开启时刻之间的差值。为了实现副边零死区时间损耗，根据公式 3 和公式 4 的分析，BCM 场景下的死区时间需满足 $TD = TT$ ，DCM 场景下，死区时间近似等于 0。使用 2.2 节中描述的控制方法，可以在 BCM 场景下将死区时间收敛至 $TD = TT + T3rd_ZVD$ ，在 DCM 场景下收敛至 $TD = \min(Tprop, TT) + T3rd_ZVD$ ，其中 $Tprop$ 为同步整流信号和真实电流过零点之间的传输延迟。

副边自适应死区时间控制亦能简化同步整流设计，可有效避免同步整流早开通导致的电流尖峰或震荡。图 2-4 展示了过短的死区时间（ $TD < TT$ ），同步整流管 non-ZVS 开通引发的电流尖峰现象。当使用基于 ZVD 的自适应死区时间控制时，副边同步整流管均为 ZVS 开通，可以避免电流尖峰的出现。

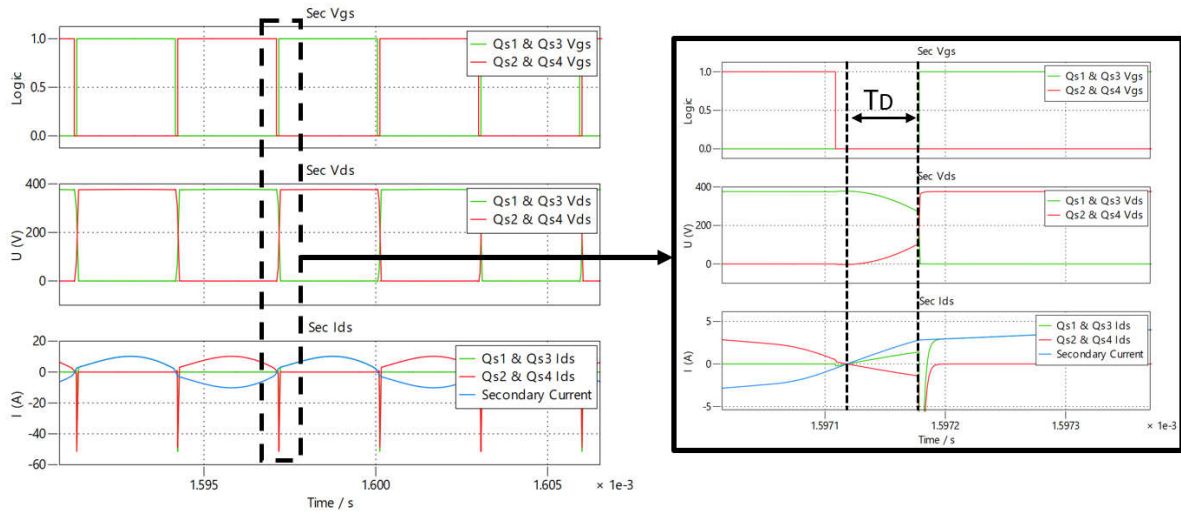


图 2-4. 过短的副边同步整流死区导致出现电流尖峰

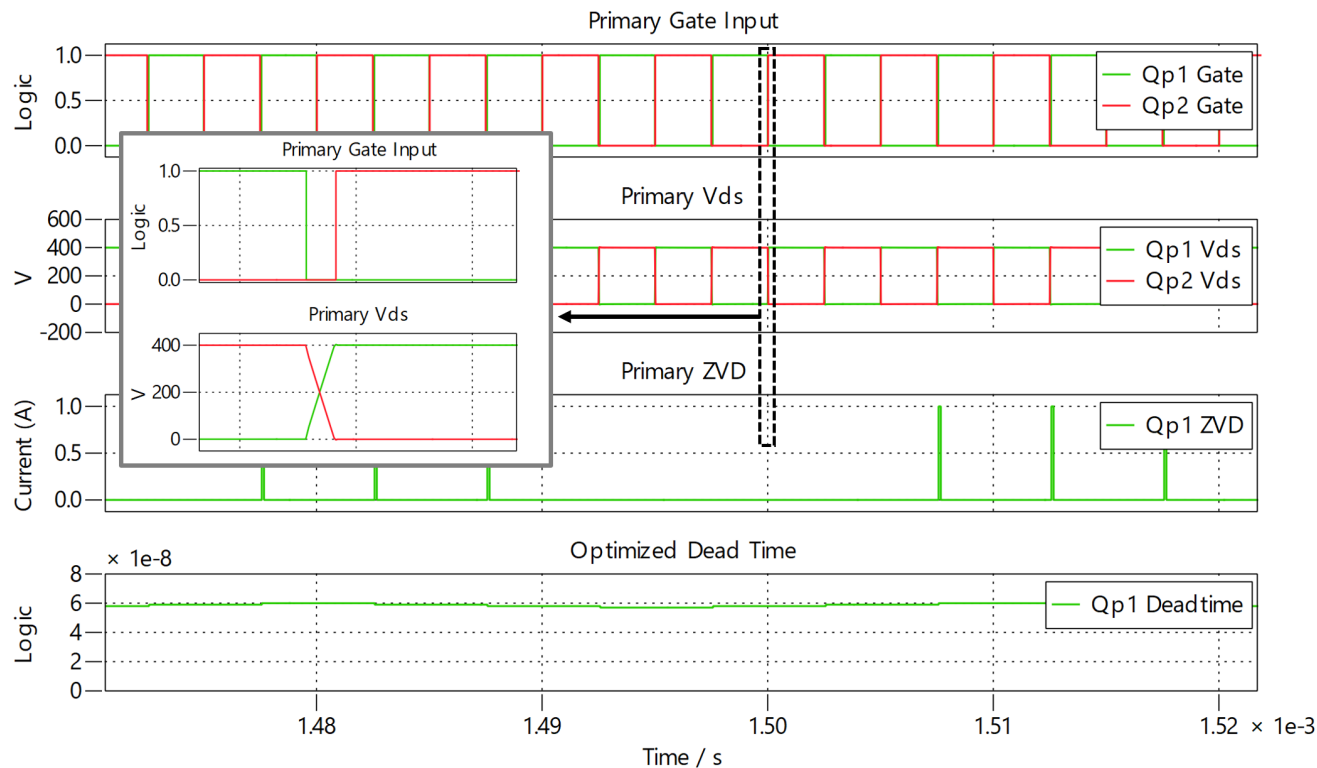


图 3-4. 原边稳态仿真结果

图 3-5 和 图 3-6 分别展示了副边在稳态 BCM 和 DCM 工况下的波形。与原边情况类似，Qp1 的死区时间收敛至 $TT+T3rd_ZVD$ 。放大的波形显示了非 ZVD 检测管 Qp2 的开启状态，补偿后的死区时间约等于 TT ，第三象限损耗非常小。

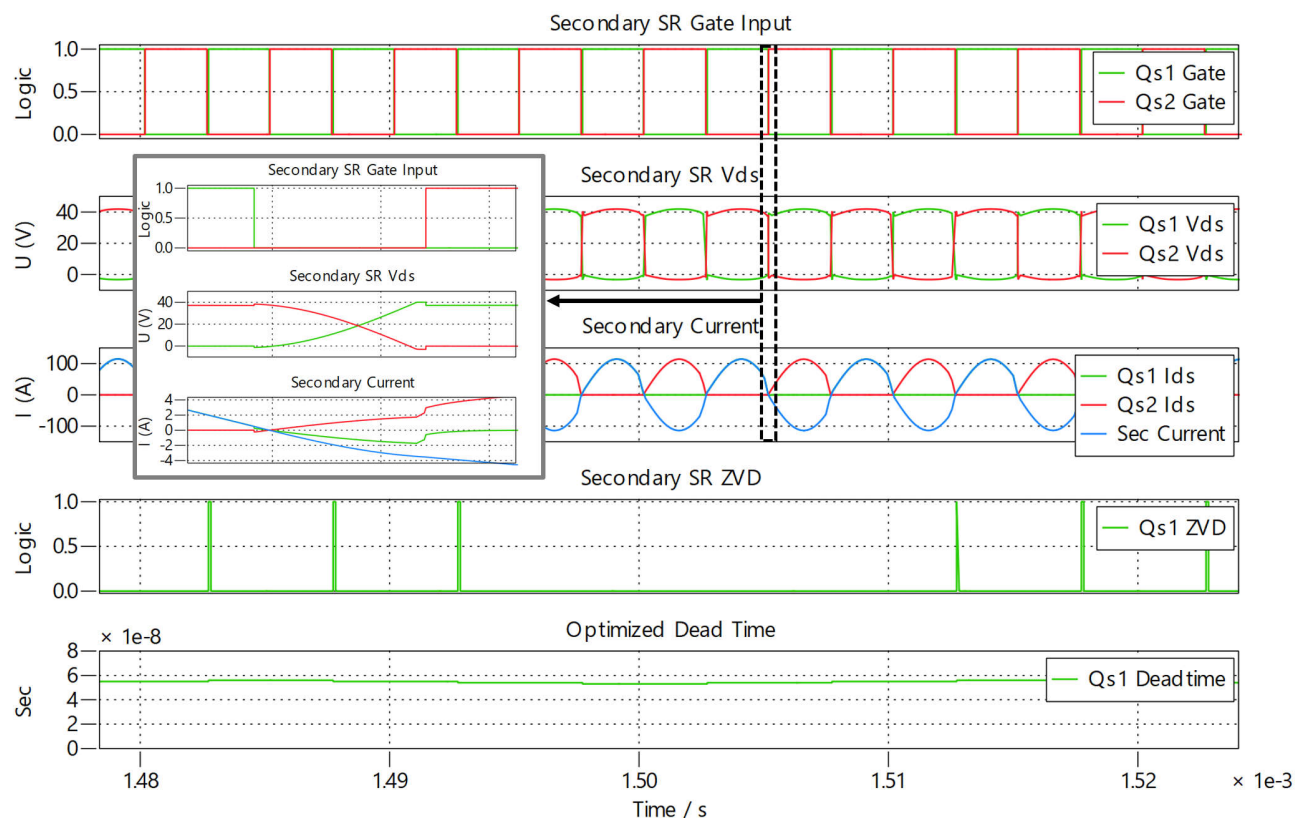


图 3-5. 副边 BCM 稳态仿真结果

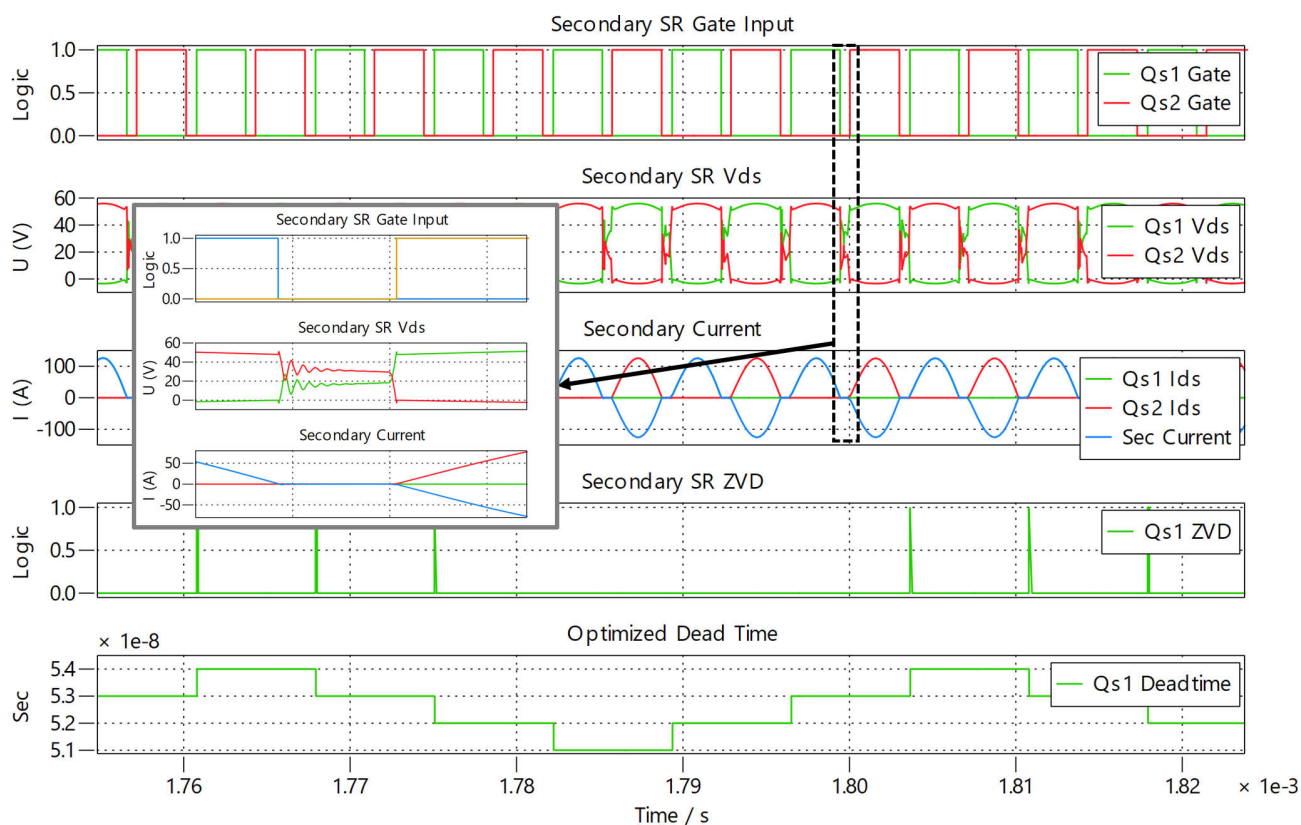


图 3-6. 副边 DCM 稳态仿真结果

表 3-1 总结了不同工况下的原副边的第三象限导通损耗。当使用基于 ZVD 的自适应死区时间控制时，原边和副边 GaN 的第三象限导通损耗都会显著降低。唯一例外的是，在欠谐振重载时，副边 DCM 峰值电流较大， $R_{ds(on)}$ 压降会短暂超过反向导通电压，导致第三象限导通损耗显著增加。即使是在这种异常情况，自适应死区时间控制也能最大程度地降低第三象限导通损耗。

表 3-1. 不同仿真工况下的原副边第三象限导通损耗

Power	Side	fs = 140kHz		Fs = 170kHz (Resonant)		fs = 200kHz	
		ZVD-DT	250ns Fix	ZVD-DT	250ns Fix	ZVD-DT	250ns Fix
P = 3000W	Primary	0.08W	1.02W	0.07W	0.95W	0.13W	1.38W
	Secondary	9.7W	14.8W	0.03W	3.7W	0.09W	5.03W
P = 1500W	Primary	0.09W	1.45W	0.09W	1.21W	0.07W	1.06W
	Secondary	0.07W	1.06W	0.03W	0.73W	0.07W	1.84W

4 总结

本文介绍了 GaN 的第三象限特性，并深入探讨了 GaN 在软开关拓扑中的死区时间损耗产生原理。提出了一种基于 TI GaN ZVD 技术的自适应死区时间调整机制，能够自适应优化 LLC/CLLC 拓扑原副边死区时间，降低死区时间损耗，将 GaN 器件高反向导通电压所带来的不利影响降至最低。

5 参考文献

1. LLC resonant converters: an overview of modeling, control and design methods and challenges. Claudio Adragna
2. LMG3526 Datasheet
3. How GaN switch integration enables low THD and high efficiency in PFC. Brent McDonald
4. 最大化具有理想二极管模式的 GaN 的性能. Yichi Zhang, Fei Yang
5. Does GaN Have a Body Diode? - Understanding the Third Quadrant Operation of GaN. Bingyao Sun

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月