

如何避免 LMG3427 在 TCM PFC 中 由相间电容引起的 ZCD 时序问题

Peter Ban, Harry Ma

摘要

本文介绍了 LMG3427 的 ZCD 实现原理，以及如何实现 LMG3427 在交错 TCM PFC 中的应用。给出了基于 LMG3427 的交错 TCM PFC 的应用时序，同时针对应用中出现的由于相间电容造成的 ZCD 时序问题进行了分析。分析了问题波形和时序，并给出了相关的设计建议以避免在 TCM PFC 应用中由于相间电容造成的 LMG3427 ZCD 时序问题。

内容

1	LMG3427 在交错 TCM PFC 中的实现	2
1.1	交错 TCM PFC 的拓扑结构	2
1.2	LMG3427 的 ZCD 检测原理	2
1.3	基于 LMG3427 的 TCM PFC 的应用时序	3
2	在 TCM PFC 中由相间电容引起的 ZCD 时序问题	5
2.1	由于不好的 Layout 造成的相间寄生电容	5
2.2	由于相间寄生电容操作的 ZCD 时序问题，	5
2.3	TCM PFC 中由相间电容引起的 ZCD 问题时序分析	7
3	如何在 PCB 设计时避免由相间电容造成的 ZCD 时序问题	9
4	总结	10
	References	10

Figures

Figure 1.	三相交错 TCM PFC 拓扑结构	2
Figure 2.	ZCD 脉冲时序，IN 引脚置高时刻电流为负	2
Figure 3.	ZCD 脉冲时序，IN 引脚置高时刻电流为正	3
Figure 4.	单相 TCM PFC 运行结构	3
Figure 5.	基于 LMG3427 的 TCM PFC 的应用时序	4
Figure 6.	不好的 PCB 设计，相邻 SW 节点平面间存在大面积交叠	5
Figure 7.	由于相间电容造成的 LMG3427 的 ZCD 问题波形，B 相 ZCD 信号在 B 相电流过零前提前发出	6
Figure 8.	问题波形，流经 B 相的电流的震荡造成了 B 相 ZCD 信号提前发出	7
Figure 9.	ZCD 问题时序	8
Figure 10.	通过外部飞线消除 A 相和 B 相间的重叠	9
Figure 11.	消除 A 相和 B 相间的重叠后，正常波形	9

1 LMG3427 在交错 TCM PFC 中的应用

1.1 交错 TCM PFC 的拓扑结构

图 1 所示为三项交错的 TCM PFC 的电路结构框图，其中 S_{11} 和 S_{12} 为第一相的快管桥臂， S_{21} 和 S_{22} 为第二相的快管桥臂， S_{31} 和 S_{32} 为第三相的快管桥臂，三相错相 120 度。 S_{N1} 和 S_{N2} 为慢管。 L_1 , L_2 , L_3 为各相电感， V_n 为交流输入电压， C_{out} 为输出母线电容。

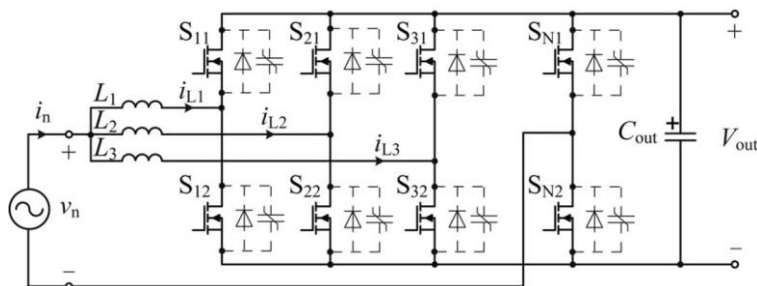


Figure 1. 三相交错 TCM PFC 拓扑结构

1.2 LMG3427 的 ZCD 检测原理

LMG3427 内置的 ZCD 过零检测功能。其规定流过电流的正方向为从漏极到源极，当 IN 引脚为高时，如果此时电感电流为负，在经过 t_{zcd_Blank} 时间后，在电流由负到正的过零时刻，经过一个延迟时间 t_{zc_Det} 后，LMG3427 会发出一个脉冲宽度为 t_{wd_zvd} 的 ZCD 脉冲。

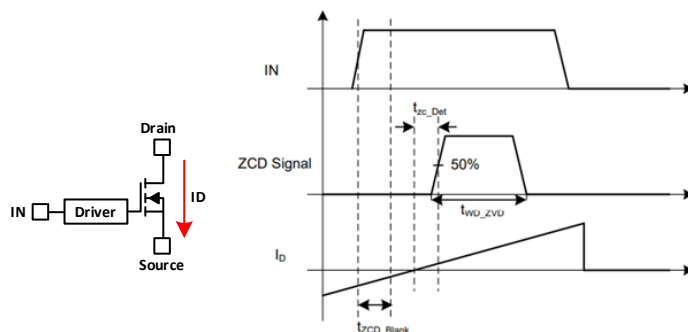


Figure 2. ZCD 脉冲时序，IN 引脚置高时刻且电流为负时

当 IN 引脚为高时，如果此时电流已经为正，在经过一个 t_{zcd_Blank} 时间后，LMG3427 会直接发出一个脉冲宽度为 t_{wd_zvd} 的 ZCD 脉冲。

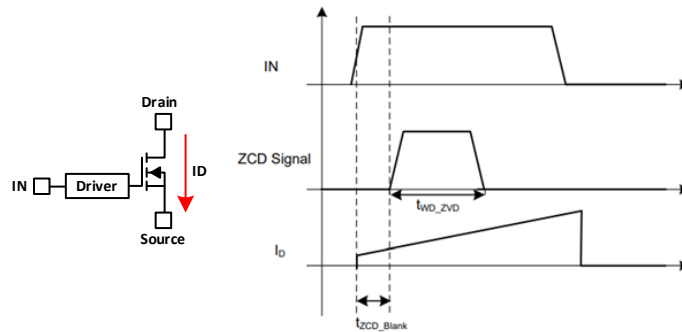


Figure 3. ZCD 脉冲时序，IN 引脚置高时刻且电流为正时

1.3 基于 LMG3427 的 TCM PFC 应用时序

在 TCM 控制的 PFC 应用中，下管的 ZVS 是实现高效率系统的关键。如图所示为三相交错的 TCM PFC 的结构，当电感电流过零时，LMG3427 会发出 ZCD 信号，当 MCU 检测到 ZCD 信号后，会计算出如图所示的 T4 到 T5 的同步管的延迟导通时间。使得获得一定的负向电感电流，为桥臂下管的 ZVS 提供条件。因此在 TCM PFC 的应用中，精准的电感电流的过零检测将变得十分重要，如果过零检测信号提前，可能会造成负向电流不够或者电流没有过零，使得下管的 ZVS 丢失，影响系统的效率。同样的，如果过零检测信号滞后，会造成负向电流过大，使得导通损耗增加，同样影响系统的效率。基于 LMG3427 的 ZCD 功能的 TCM 方案可以实现精准的过零控制，从而实现整个系统的高效运行。由于在 TCM PFC 中，三相交错运行，为了简化分析，以单相运行为例，分析 LMG3427 在 TCM PFC 中应用时的工作时序。

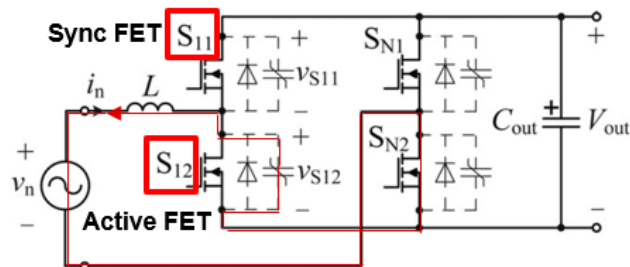


Figure 4. 单相 TCM PFC 运行结构

如下是基于 LMG3427 的 TCM PFC 的运行时序分析，

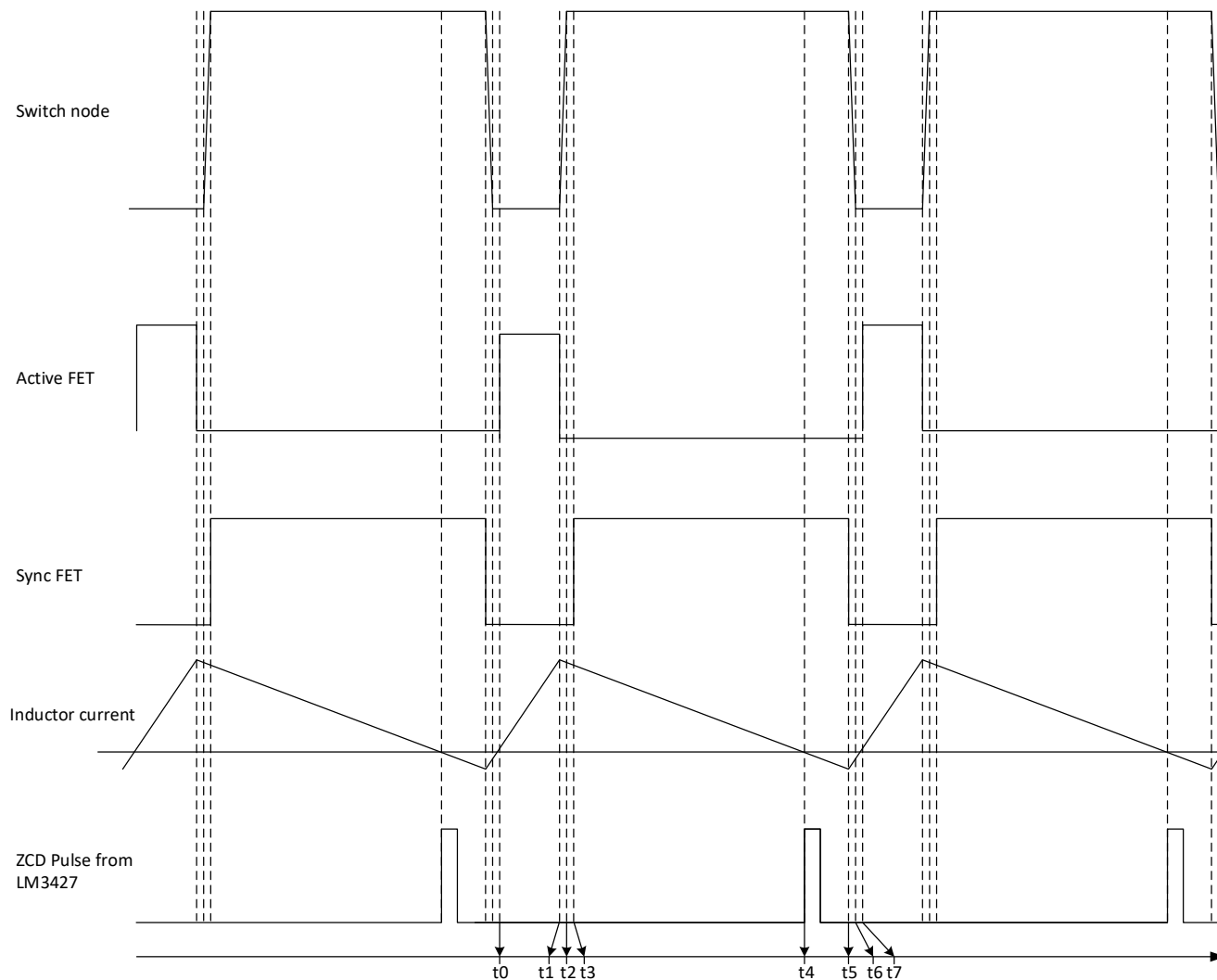


Figure 5. 基于 LMG3427 的 TCM PFC 的应用时序

阶段 1($t_0 - t_1$), 在 t_0 时刻, 主动管打开, 电感电流开始线性上升。

阶段 2($t_1 - t_2$) 在 t_1 时刻, 主动管关断, 此时同步管保持关断, 此时电感电流开始为主动管的 C_{oss} 充电, 同时为同步管的 C_{oss} 放电。

阶段 3($t_2 - t_3$), 在 t_2 时刻, 同步管放电完成, 此时同步管仍保持关闭, 电感电流开始通过同步管进行续流。为同步管的 ZVS 做好准备。

阶段 4 ($t_3 - t_4$), 在 t_3 时刻, 同步管 ZVS 开通, 在此阶段电感电流线性下降。

阶段 5 ($t_4 - t_5$), 在 t_4 时刻, 电感电流过零, 在经过一个 ZCD 检测的延迟时间后 (未在图中画出), LMG3427 的 ZCD 引脚会发出一个 ZCD 脉冲来指示电感电流过零。同步管会继续导通一段时间直到 t_5 时刻, 使电感获取一定的负向电流, 为主动管的 ZVS 创造条件。 $t_4 - t_5$ 的这段时间我们可以称为同步管的延迟关断时间。

阶段 6 ($t_5 - t_6$), 在 t_5 时刻, 同步管关闭, 由于此时电感电流为负, 电感电流开始为同步管的 C_{oss} 充电, 同时为主动管的 C_{oss} 放电。

阶段 7 ($t_6 - t_7$), 在 t_6 时刻, 主动管的 C_{oss} 放电完成, 由于此时主动管仍然保持关闭, 电感电流开始通过主动管进行续流, 为主动管的 ZVS 做好准备。在 t_7 时刻, 主动管 ZVS 开通。

2 在 TCM PFC 中由相间电容引起的 ZCD 时序问题

2.1 由于未优化的 Layout 造成的相间寄生电容

下图所示为一个在实践中不好的 Layout 造成的相间寄生电容及其等效电路。如图所示在 A 相和 B 相的开关结点平面之间存在一个较大的交叠面积, 这会在 A 相和 B 相的开关结点间引入一个相对较大的寄生电容。

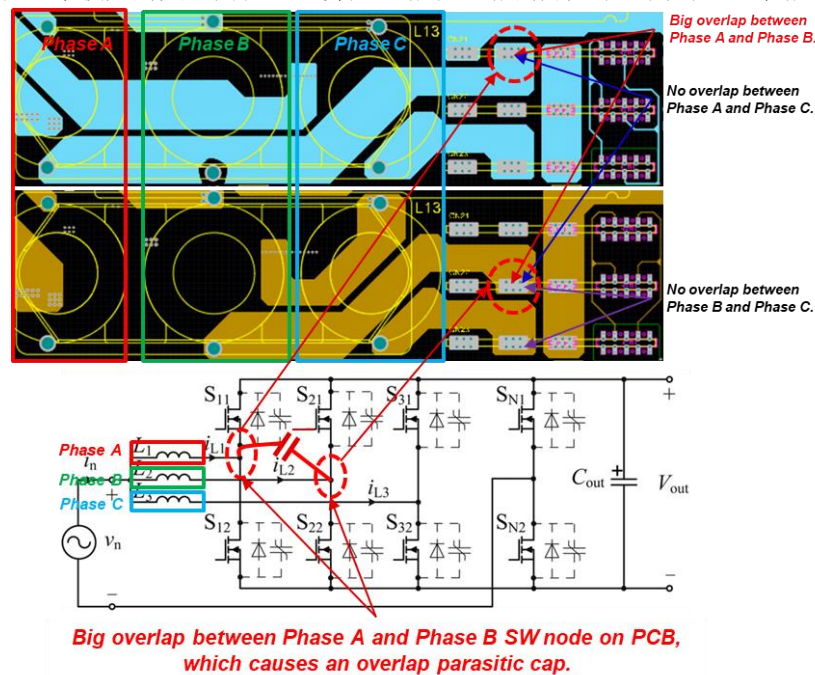


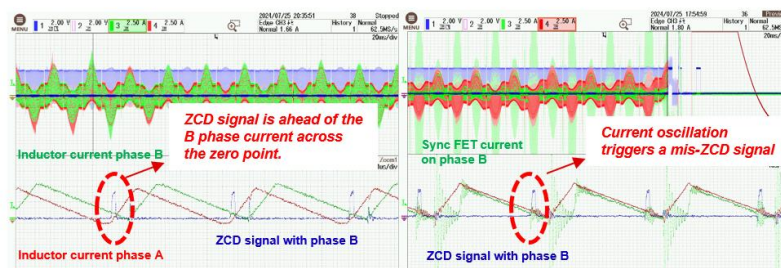
Figure 6. “不完美”的 PCB 设计, 相邻 SW 节点平面间存在大面积交叠

2.2 由于相间寄生电容造成的 ZCD 时序问题,

如下所示为由相间电容引起的 ZCD 问题波形, 在电感电流过零之前, LMG3427 的 ZCD 信号会提前发出, 这会造成系统的 ZCD 时序出现问题, 使得系统的 ZVS 无法实现。


Challenge:

- ZCD signal is ahead of the B phase current across zero point.



Issue waveforms, The ZCD signal is ahead of the inductor current across the zero point in Phase B.

Figure 7. B 相 ZCD 信号在 B 相电流过零前提前发出

通过直接测量流过 LMG3427 的电流，可以看到，在 ZCD 信号发出的附近，LMG3427 上的电流会出现很大的振荡，ZCD 信号的提前发出，是因为实际电流由于振荡导致过零真实发生，进而 LMG3427 发出 ZCD 信号，而不是由于 LMG3427 本身误报了 ZCD 信号。

通过进一步分析问题时序，我们发现，在 A 相主动管开通瞬间，流经 B 相的电流会出现一个电流的振荡，实际造成了电流过零，LMG3427 发出 ZCD 信号，由于 ZCD 信号的提前发出，造成了负向电感电流不足，使得 ZVS 消失。

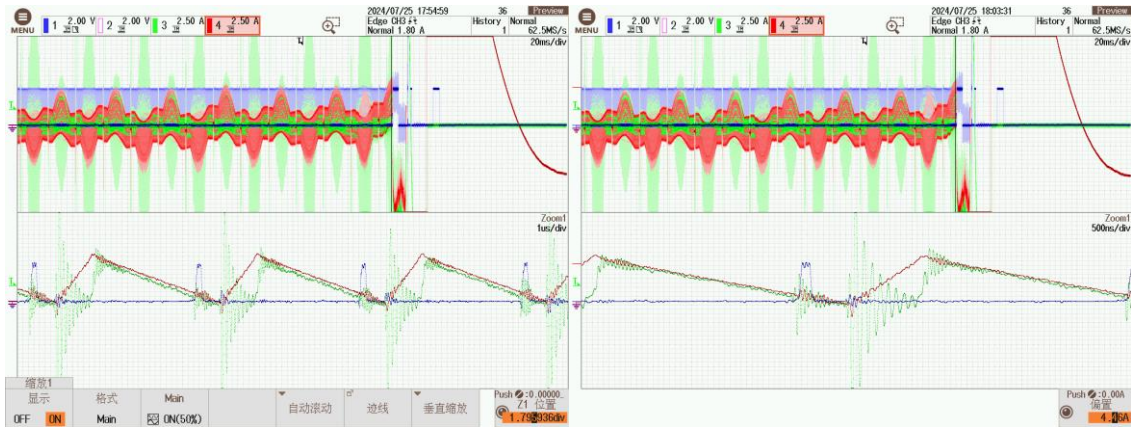


Figure 8. 问题波形，流经 B 相的电流的震荡造成了 B 相 ZCD 信号提前发出

2.3 TCM PFC 中由相间电容引起的 ZCD 问题时序分析

如下是基于 LMG3427 的 TCM PFC 的运行时序分析，

阶段 1 ($t_0 - t_1$), 在 t_0 时刻, B 相主动管开始导通, B 相开关结点电压下降, 电感电流开始线性上升, B 相主动管开始硬换流, 此时由于 ZVS 丢失, 开通损耗增加。

阶段 2 ($t_1 - t_2$), 在 t_1 时刻, B 相主动管的硬换流结束, 此时由于 B 相主动管仍然保持导通状态, 电感电流持续线性上升。

阶段 3 ($t_2 - t_3$), 在 t_2 时刻, B 相主动管关断, 此时 B 相同步管保持关断, 此时电感电流开始为 B 相主动管的 C_{oss} 充电, 同时为 B 相同步管的 C_{oss} 放电。

阶段 4 ($t_3 - t_4$), 在 t_3 时刻, B 相同步管放电完成, 此时 B 相同步管仍保持关闭, 电感电流开始通过 B 相同步管进行续流。为 B 相同步管的 ZVS 做好准备。

阶段 5 ($t_4 - t_5$), 在 t_4 时刻, B 相同步管 ZVS 开通, 电感电流线性下降。

阶段 6 ($t_5 - t_6$), 在 t_5 时刻, A 相主动管开通, 由于 A 相和 B 相间存在一个较大的相间电容, 因此在 A 相主动管开通的瞬间, 有一个从 B 相开关结点流向 A 相开关结点的电流, 使的流经 B 相同步管的电流出现振荡, 发生实际过零, 造成 LMG3427 提前发出用于实现 B 相 ZVS 开通的 ZCD 信号。

阶段 7 ($t_6 - t_7$), 在 t_6 时刻, B 相同步管关断, 此时电感电流通过同步管的“体二极管”进行续流, 电感电流线性下降, 但是由于此时电感电流方向为正, 存储在 B 相主动管 C_{sw} 的能量无法释放, 无法为 B 相主动管的 ZVS 提供条件。

阶段 8 ($t_7 - t_8$), 在 t_7 时刻, B 相主动管开通, 由于 B 相同步管的 ZVS 丢失, B 相开关结点电压下降, 电感电流开始线性上升, B 相主动管开始硬换流, 开通损耗增加。

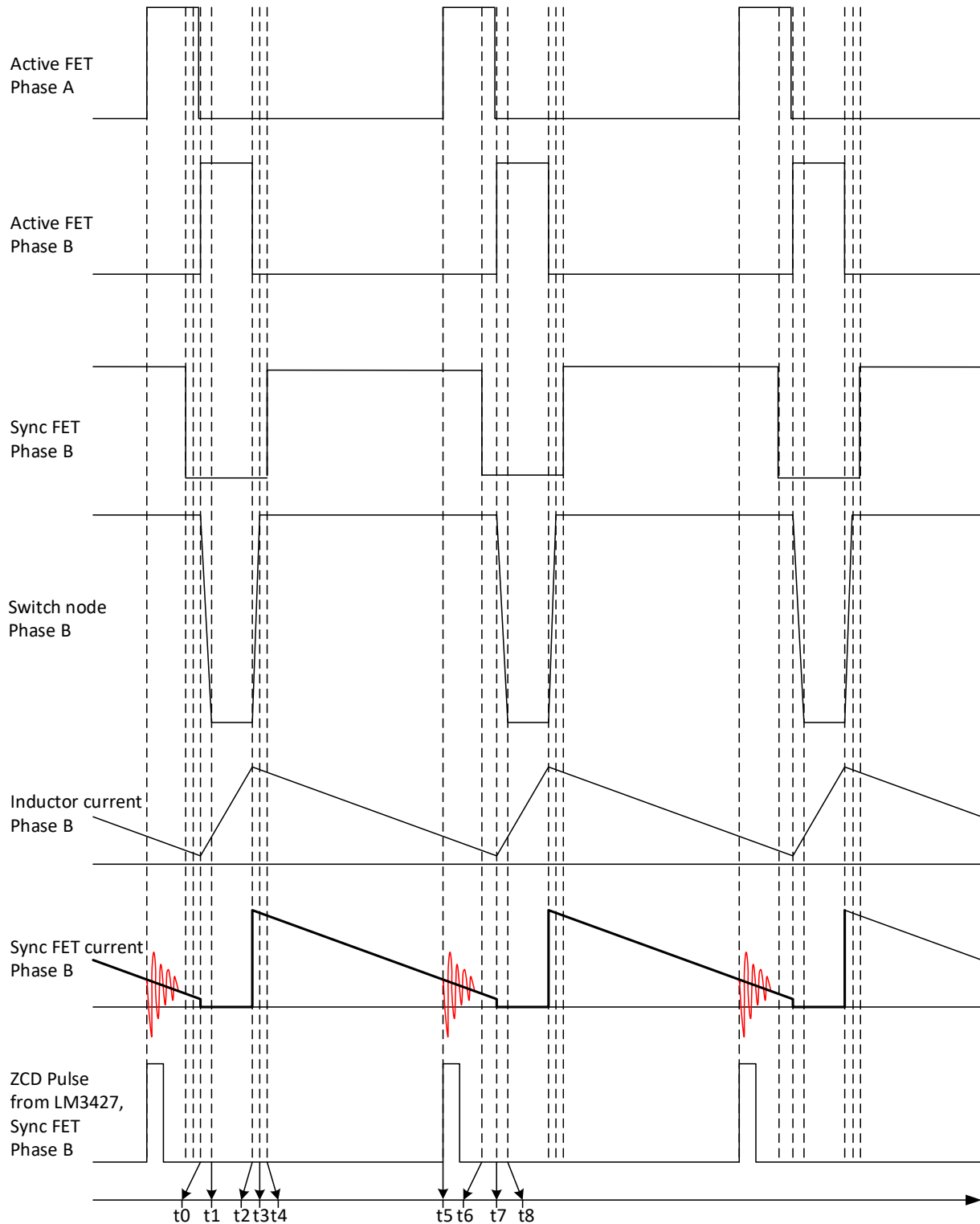


Figure 9. ZCD 问题时序

3 如何在 PCB 设计时避免由相间电容造成的 ZCD 时序问题

通过之前的分析，流经 B 相同步管电流上发生的振荡，是在 A 相开通瞬间出现的。ZCD 提前发出的问题只存在于 A 相和 B 相之间，而 B 相和 C 相之间，A 相和 C 相之间并没有 ZCD 提前发出的问题。通过仔细分析 PCB，发现在 A 相和 B 相的开关节点存在大面积的重叠，这会造成 A 相和 B 相的开关节点间存在一个较大的寄生电容。当 A 相主管开通时，A 相开关节点电位会发生突变，会有一个较大的负向电流给该寄生电容充电，使得流经 B 相同步管的电流发生实际过零，造成 ZCD 信号提前发出，造成 ZVS 丢失。基于以上分析，通过飞线的方式，移除了 A 相和 B 相间开关节点的重叠后，问题得到了解决。

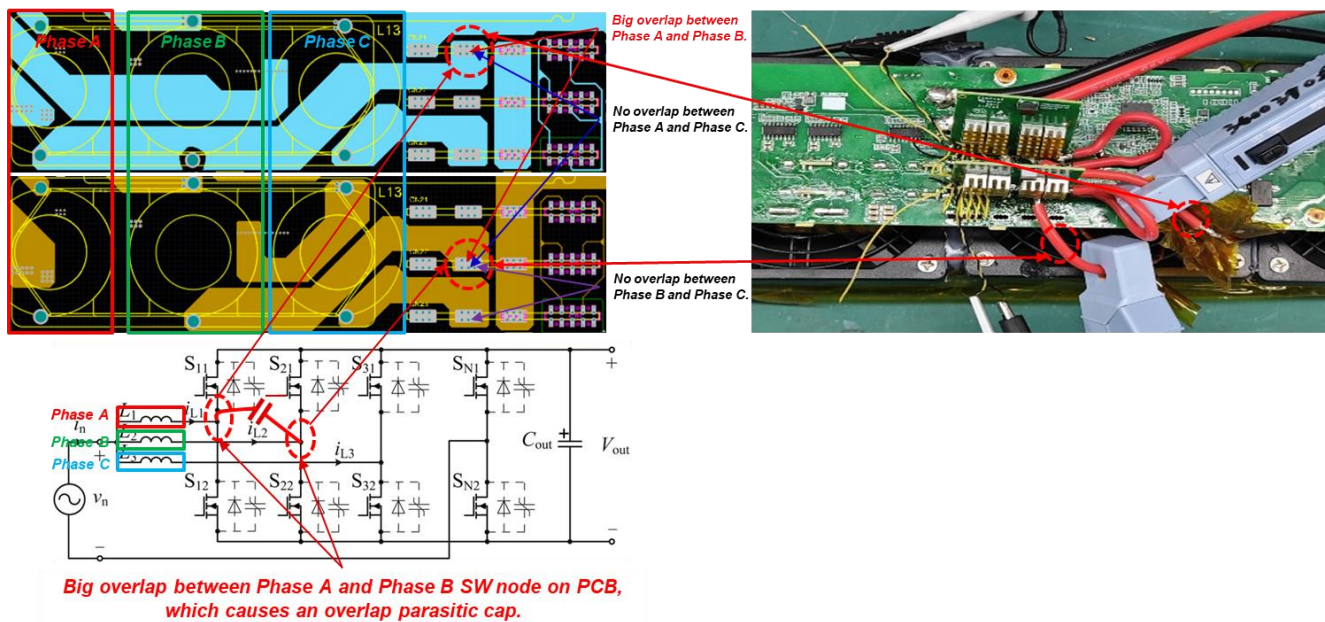


Figure 10. 通过外部飞线消除 A 相和 B 相间的重叠

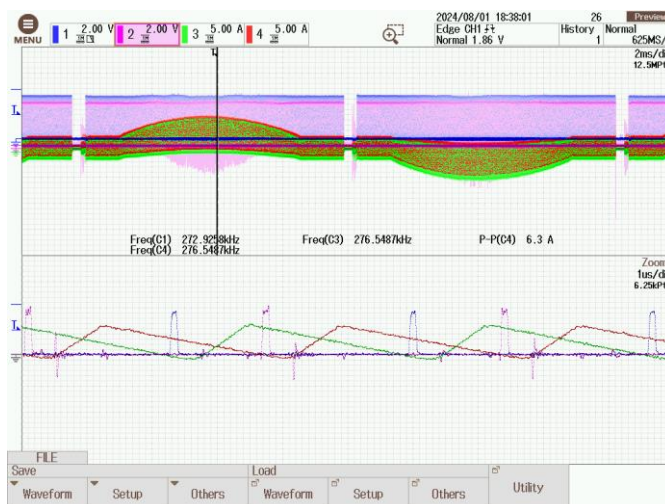


Figure 11. 消除 A 相和 B 相间的重叠后，正常波形

如图 11 所示，当通过飞线的方式移除 A 相和 B 相间的重叠后，由相间电容引起的 ZCD 时序问题得到解决，因此在使用 LMG3427 时，需要在 PCB 设计时，避免各相的开关结点间存在较大的重叠。

4 总结

本文介绍了 LMG3427 的 ZCD 实现原理，以及如何实现 LMG3427 在交错 TCM PFC 中应用。给出了基于 LMG3427 的交错 TCM PFC 的应用时序，同时针对应用中出现的由于相间电容造成的 ZCD 时序问题，分析了问题波形和时序，最后给出了相关的设计建议以避免在 TCM PFC 应用中由于相间电容造成的 LMG3427 ZCD 时序问题。

References

1. Ultraflat Interleaved Triangular Current Mode (TCM) Single-Phase PFC Rectifier
2. LMG3427 datasheet.

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](https://www.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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月