

## Application Brief

## 基于霍尔效应电流传感器的 CLLLC 转换器中的同步整流控制



Vsevolod Elantsev

基于软开关拓扑的电源转换器越来越受欢迎。LLC 和 CLLLC 等谐振转换器，凭借软开关特性，实现了高开关频率，同时也带来了高功率密度。然而，高开关频率也给系统设计增加了一定的复杂性。CLLLC 转换器是一种双向拓扑，广泛用于光伏逆变器和电池储能系统。为了进一步提高效率，降低功率耗散，可以在转换器的次级侧实现同步整流 (SR)。测量用于实施 SR 的电流。由于转换器处于高频运行状态，而且测量电流与实际电流之间存在高传播延迟，因此分流或电流互感器等传统方法不再是理想之选。为了解决高传播延迟问题，可以使用 Rogowsky 线圈等替代方案，但是，Rogowsky 线圈仍需要外部电路。德州仪器 (TI) 推出的霍尔效应电流传感器，具有低传播延迟、高带宽和低失真等特点，非常适合用于同步整流控制。本应用简报提出了电流检测传播延迟的性能评估方案。

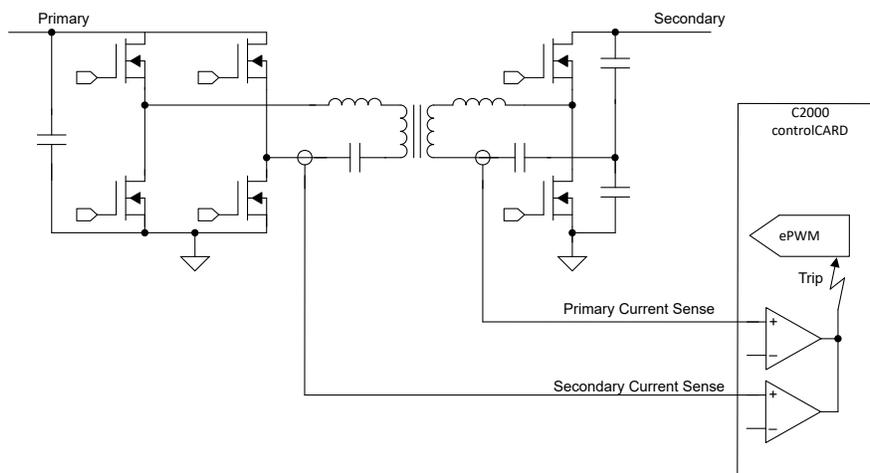


图 1. CLLLC 转换器的控制方案

一些 LLC 转换器在次级侧设计中使用二极管，这是一种简单而经济的解决方案。相比之下，在次级侧使用 SR 虽然复杂且昂贵，但由于散热器体积更小，其效率更高且结构更紧凑。此外，采用 SR 的转换器还可以实现双向功率流动。当变压器两侧均配备谐振回路，该转换器被称为 CLLLC 转换器。CLLLC 谐振拓扑可用于双向和混合光伏逆变器，实现隔离式低压至高压和高压至低压的能量转换。

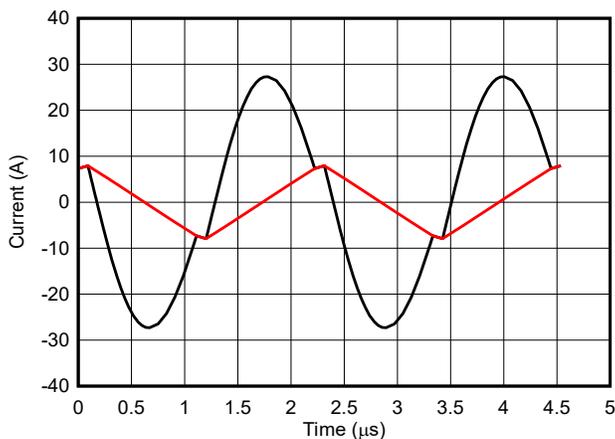


图 2. 初级侧电流和磁化电流

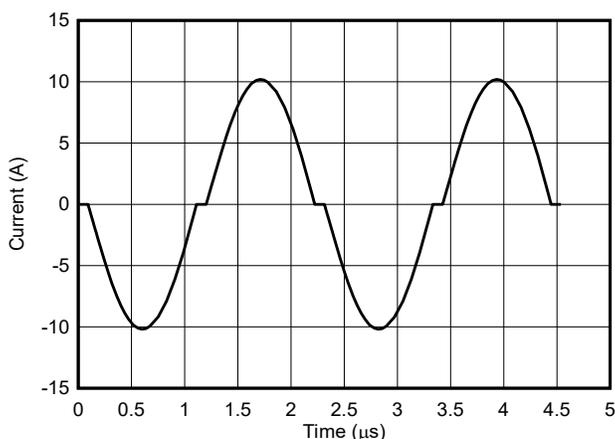


图 3. 次级侧电流

在 SR 中，变压器一侧作为激励电路运行，而另一侧作为同步整流器运行。通过控制同步整流器实现效率最大化。当运行频率低于谐振频率时，初级侧电流与磁化电流一致，初级侧到次级侧的能量传递周期短于开关周期。如图 3 所示，在某些周期内，次级侧电流会降为零。当次级侧电流降为零时，必须及时关闭 SR 开关以防止反向电流流动。

系统控制器需要检测次级侧电流，并生成与次级侧电流同步的 SR 控制信号。SR 控制的主要挑战在于需要在电流接近零时停止同步整流操作，但不能允许电流跨过零点。电流测量、信号隔离和栅极驱动器电路中出现的任何延迟都会增加控制的复杂性。图 1 中显示了典型的 SR 控制结构。初级侧和次级侧 PWM 信号保持同步，但当次级侧电流 ( $I_s$ ) 的绝对值低于某个阈值时（通常为最大电流的 5%），次级侧 PWM 信号将被关闭。图 4 是调制时序图。借助 C2000 实时微控制器 (MCU) 系列，可以配置 ePWM、CMPSS 和 PWMXBAR 模块，使硬件中的调制方案不需要 CPU 参与。如图 4 所示，SR PWM 模块连接到 CMP 信号，当电流降到阈值以下时关断。

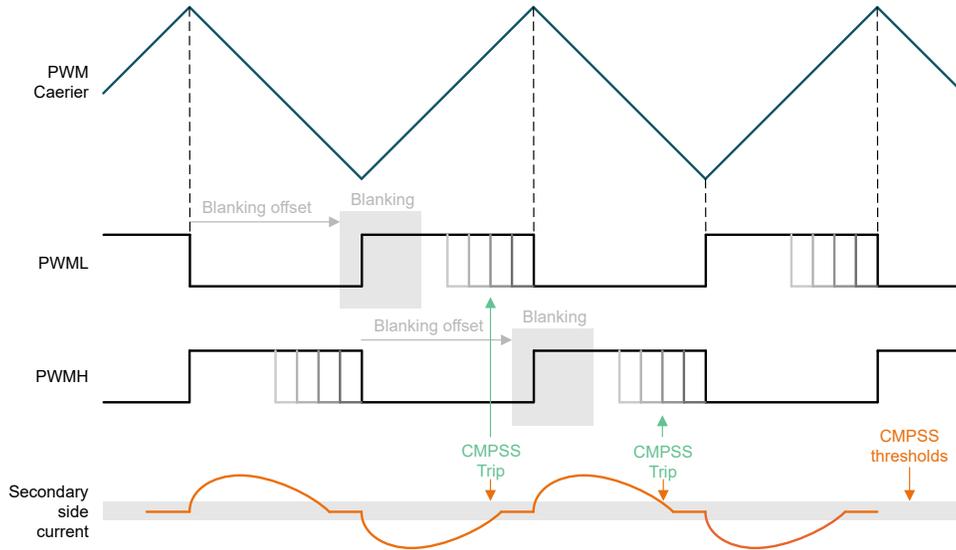


图 4. CLLC 调制时序图

在超过 300kHz 的高频运行下，CLLLC 转换器的电流检测是一项挑战。电流检测解决方案需要具备足够的带宽和低延迟性能。传统上，Rogowski 线圈常用于同步整流 (SR) 应用中。Rogowski 线圈需要额外的电路，用于将输出电流转换为输出电压，以供比较器使用。图 5 显示了解决方案。

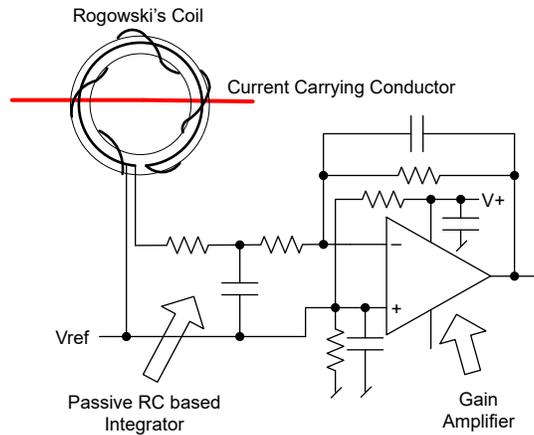


图 5. Rogowski 线圈电路示例

Rogowski 线圈通常为定做产品，难以直接商业采购。

一种替代方案是使用快速响应的霍尔效应电流传感器，例如 **TMCS1133**。功能方框图如图 6 所示。TMCS1133 提供 1MHz 带宽和 50ns 的低传播延迟。TMCS1133 具备强化的隔离性能、对外部磁场的高抗扰度和偏移消除功能、是同步整流控制的理想选择。

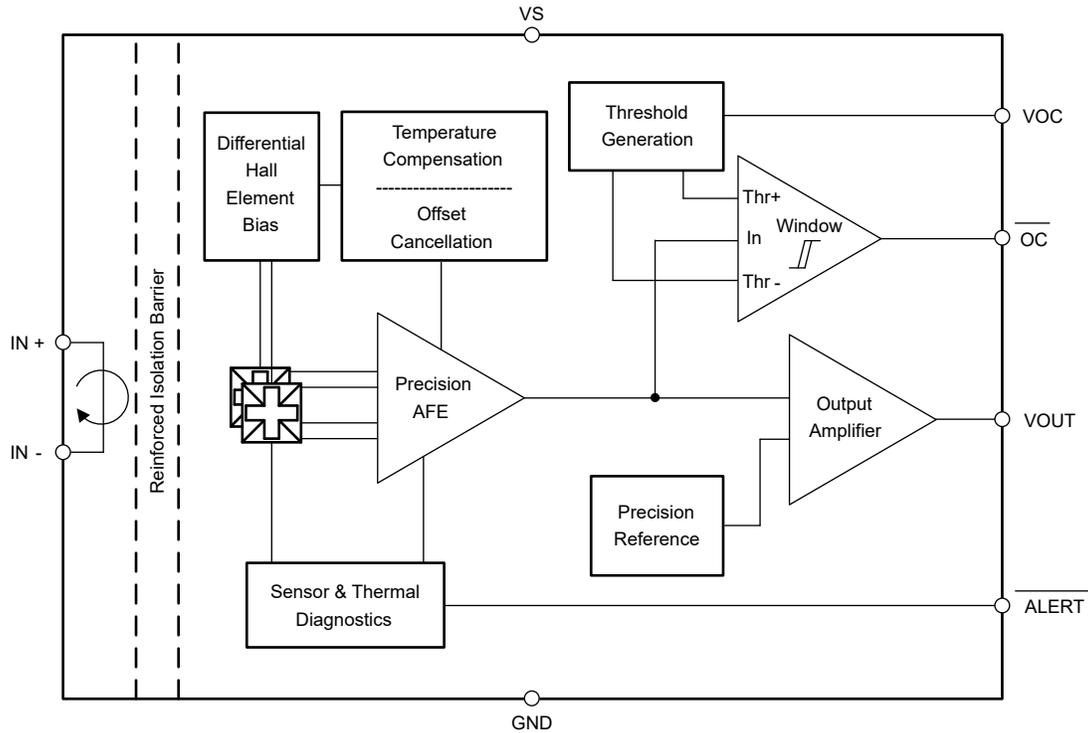


图 6. TMCS1133 霍尔效应电流传感器方框图

通过比较两种霍尔传感器，可以看出精准时序对于高频 CLLLC 转换器的性能至关重要。在仿真实验中，使用传播延迟分别为 50ns 和 250ns 的两种电流传感器，转换器的开关频率为 450kHz。

功率开关的电压和电流波形分别如图 7 和图 8 所示。

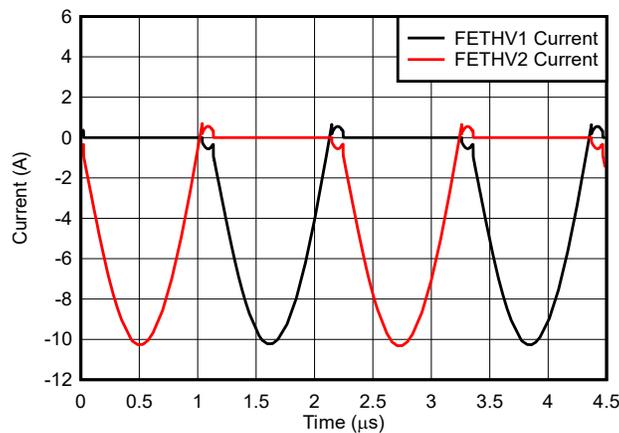


图 7. 具有不同传播延迟的 SR 开关在  $T_{PD}$  为 50ns 时的电流表现

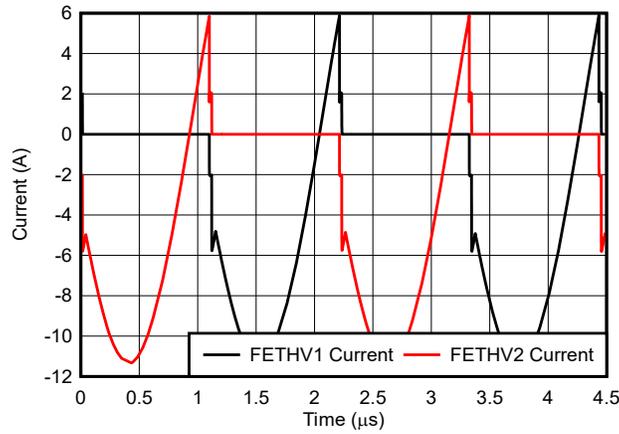


图 8. 具有不同传播延迟的 SR 开关在  $T_{PD}$  为 250ns 时的电流表现

在理想情况下，次级侧 SR 开关在每个周期内仅会出现负电流，并在次级电流降至零时关断。但在实际运行中，次级侧开关中的电流可能会超过零，导致部分电流反向流回初级侧。开关中的正电流会引起多余的无功电流，从而导致额外损耗。

在仿真实验中， $T_{PD}$  较高的次级侧电流正振幅更大。正电流会引起两个主要问题：无功功率需要进行补偿以满足输出电流需求。由于部分能量会传输回初级侧，因此有功功率传输周期需要向次级侧提供更多能量。次级侧的 RMS 电流会显著增加。例如，对于低  $T_{PD}$  (50ns) 的次级侧电流，其 RMS 值为  $4.78A_{RMS}$ ，而对于高  $T_{PD}$  (250ns) 的次级侧电流，其 RMS 值为  $5.45A_{RMS}$ 。RMS 电流的差异使传导损耗增加了 30%。随着  $T_{PD}$  的进一步增加，RMS 电流还会继续上升。

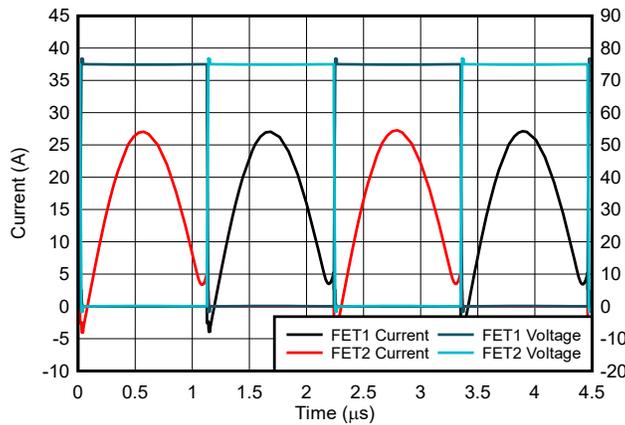


图 9. 具有不同传播延迟的初级侧开关在  $T_{PD}$  为 50ns 时的电流和电压表现

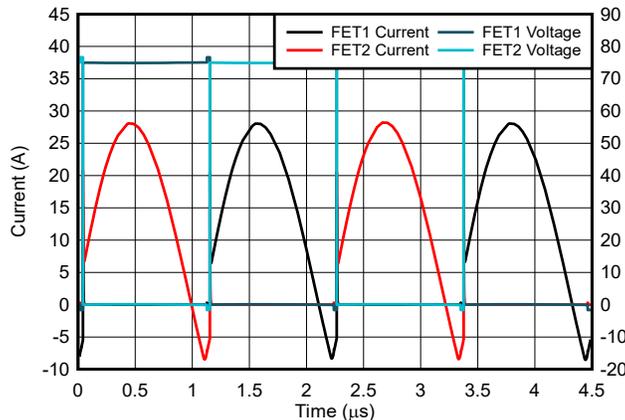


图 10. 具有不同传播延迟的初级侧开关在  $T_{PD}$  为 250ns 时的电流和电压表现

次级侧电流的无功部分还会引发第二个问题，即初级侧开关丧失零电压开关 (ZVS) 的能力。初级侧开关的 ZVS 通过变压器的磁化电流实现，如图 2 中的红色曲线所示。为了对开关的电容放电，磁化电流在开关周期结束时正值很大。次级侧电流会降低初级侧开关的有效电流。初级侧关断电流可通过方程 1 计算得出。

$$I_{\text{OFF, PRI}} = I_M - N \times I_{\text{SEC}} \quad (1)$$

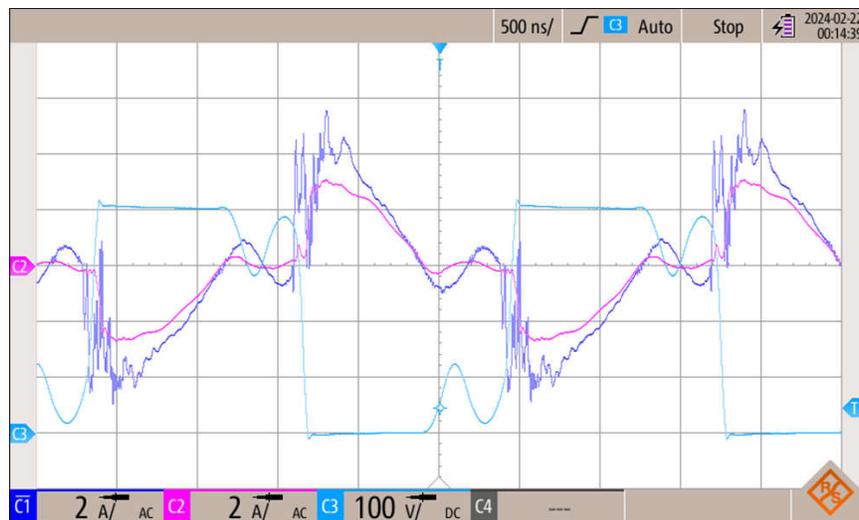
其中

- $I_{\text{OFF, PRI}}$  是初级侧开关的关断电流
- $I_M$  是磁化电流
- $N$  是匝数比
- $I_{\text{SEC}}$  是次级侧开关的电流

如果存在较大的反向功率流动，初级侧开关的关断电流可能会低于预期值。在某些情况下，初级侧关断电流甚至变为负值，从而导致初级侧开关完全进入硬开关模式。如图 9 和图 10 所示，初级侧开关在  $T_{\text{PD}}$  为 50ns 时处于软开关模式，而在  $T_{\text{PD}}$  为 250ns 时进入完全硬开关模式。硬开关会额外引起 4W 的损耗。

在  $T_{\text{PD}}$  为 50ns 时进行 1200W 的功率转换时，总损耗比在  $T_{\text{PD}}$  为 250ns 时增加约 7W。转换效率从 98.2% 降至 97.6%，减少了 0.6%。效率降低导致耗散增加了 33%。

根据仿真结果，TIDA-010933 参考设计中采用了低传播延迟的霍尔效应电流传感器 TMCS1133。TMCS1133 的传播延迟仅为 50ns，专为配合 CLLLC 转换器控制而设计。该器件的传播延迟极小，几乎不会在 CLLLC 级中引入无功功率。SR 控制波形如图 11 所示。



1. C1 是 TMCS1133 测量值
2. C2 是通过电流探头测量的电流值
3. C3 是次级侧电压

图 11. TIDA-010933 电路板次级侧电压、电流和 TMCS1133 输出的波形

波形显示，TMCS1133 在开关事件时会产生一定的噪声和振荡，但传感器输出可在 250ns 内恢复。周期开始时的噪声可通过消隐期屏蔽，不会影响转换器的最终性能。零点附近的噪声和延迟对转换器性能的影响更大。经过 300ns 的消隐期后，次级侧电流测量值与 TMCS1133 输出之间的差异达到最小。

对于高频 SR 电路，电流传感器的传播延迟非常重要。根据仿真实验结果，传播延迟达到或超过 250ns 时，会显著影响 450kHz 转换器的效率。模拟和实际实验表明，TMCS1133 凭借其超低传播延迟，在高频同步整流应用中表现优异，可有效降低整体转换损耗并提高电力转换系统的功率密度。

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 重要声明和免责声明

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、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司