Application Note

应用 UCD3138 自动模式切换功能实现 LLC 变换器输出短路下的 SR 应力抑制

Peter Ban

摘要

在 LLC 变换器的应用中，当输出短路时，流经同步整流管(SR)上的电流可能会出现反向。当 SR 关断时，由于此负向电流引起的感性能量无法释放，会导致 SR 承受过压应力风险。为避免该问题，本文首先对输出短路时 SR 的异常应力进行了详细的时序分析。在此基础上，提出了一种基于 UCD3138 数字控制器自动模式切换(Automatic Mode Switching)功能的解决方案。该方案通过硬件方式，在检测到输出短路导致的环路变化时，快速减小 SR 的导通时间，迫使 SR 在电流过零前提前关断，从而从根本上避免了负向电流的产生，消除了 SR 的应力风险。实验结果表明，该方法能快速响应并将 SR 应力从 69V 降低至 29.6V，验证了其有效性。

内容

1 问题描述：输出短路时 SR 的异常电压应力 2
1.1 异常现象：短路测试中的 SR 电压应力超标 2
1.2 根源分析：负向电流导致关断应力产生的时序机理 2
2 解决方案：基于 UCD3138 自动模式切换的 SR 应力优化 5
2.1 关键技术：UCD3138 自动模式切换(Automatic Mode Switching)功能原理 5
2.2 方案实现：利用模式切换动态调整 SR 导通时间的控制时序 6
3 实验验证：优化方案的有效性测试 8
3.1 结果对比：SR 应力从 69V 降至 29.6V 8
3.2 波形分析：SR 导通时间动态切换与提前关断 8
4 总结 10
5 参考文档 10

插图清单

图 1-1. 分立电容结构 LLC 谐振变换器拓扑 2
图 1-2. 输出短路时 SR 应力异常波形 2
图 1-3. SR 应力异常时序分析阶段一(t0-t1)：电流过零与电流反向 3
图 1-4. SR 应力异常时序分析阶段二(t1-t2)：关断延迟，负向电流继续增大 3
图 1-5. SR 应力异常时序分析阶段三(t2-t3)：绕组钳位与首次谐振(fr1) 3
图 1-6. SR 应力异常时序分析阶段四(t3-t4)：励磁电感参与谐振(fr2) 4
图 1-7. SR 应力异常时序分析阶段五(t4-t5)：原边关断与谐振回归(fr1) 4
图 2-1. UCD3138 自动模式切换(Automatic Mode Switching)机制示意图 5
图 2-2. 用于 SR 控制的自动模式切换寄存器配置关系图 6
图 2-3. 基于自动模式切换的 SR 应力优化方案时序图 7
图 3-1. 采用优化方案后输出短路的 SR 应力波形 8
图 3-2. 自动模式切换实现 SR 最大导通时间动态切换波形 9
图 3-3. SR 驱动提前关断以避免负向电流的示意波形 9

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 问题描述：输出短路时 SR 的异常电压应力

LLC 谐振变换器因其高效率和软开关特性而被广泛应用，其同步整流(SR)技术能进一步提升整机效率。然而，在输出短路等极端故障条件下，SR 可能因异常工作状态而面临过压损坏的风险。本章将具体分析这一问题的现象与根源。

1.1 异常现象：短路测试中的 SR 电压应力超标

图 1-1 为典型的分立电容结构 LLC 谐振变换器拓扑。其中，Q1 和 Q2 为原边开关管，Cr1 和 Cr2 为谐振电容，Lr 为谐振电感，Lm 为励磁电感，SR1 和 SR2 为次级同步整流管。

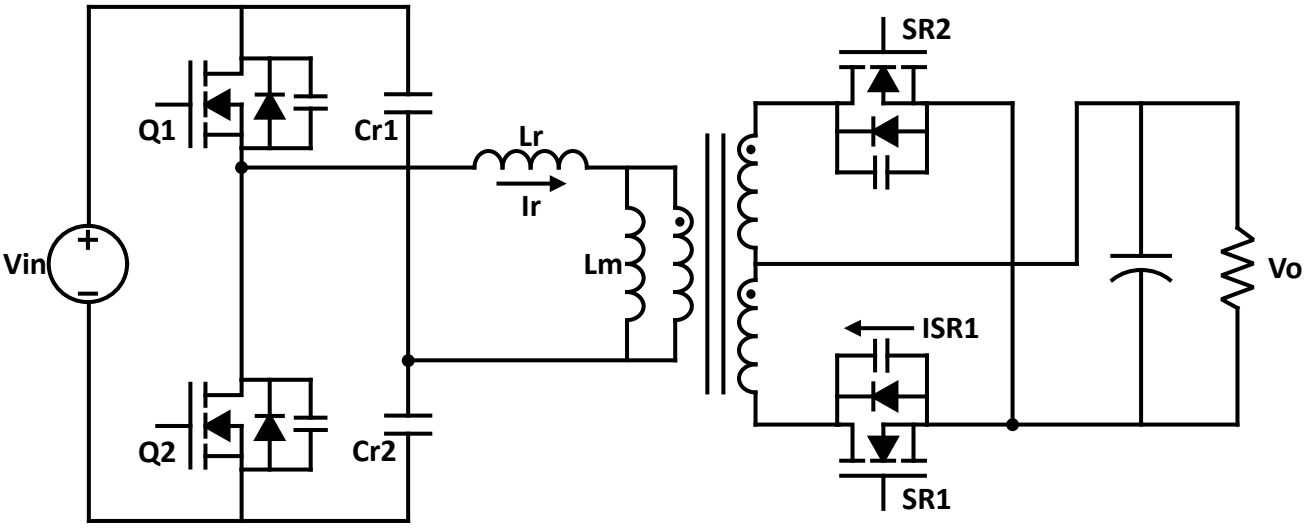


图 1-1. 分立电容结构 LLC 谐振变换器拓扑

图 1-2 为基于 1kW 参考设计 PMP40586 进行输出短路测试的波形。如图所示，当输出短路时，在 SR1 关断时刻，其漏源极电压(Vds)出现异常振荡峰值，最大应力高达 69V。此电压已超过器件安全裕量，在反复短路过程中存在损坏风险。因此，需要优化控制时序，将 SR 应力限制在安全范围内。

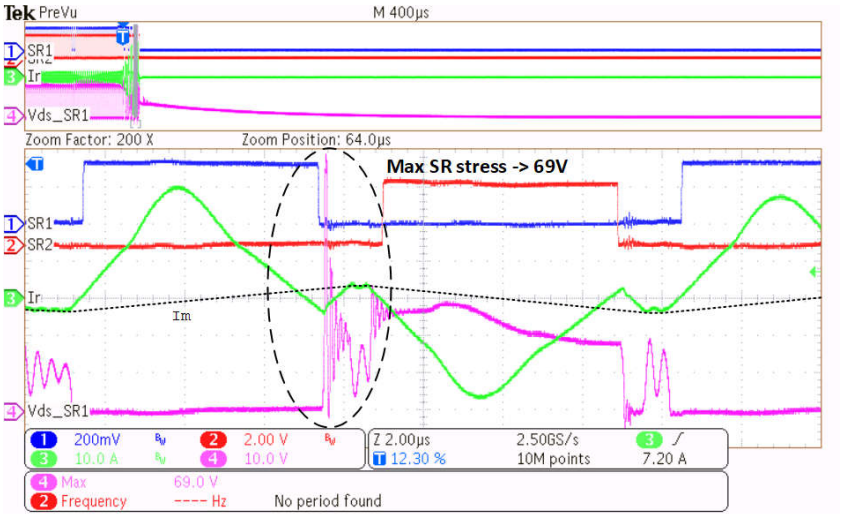


图 1-2. 输出短路时 SR 应力异常波形

1.2 根源分析：负向电流导致关断应力产生的时序机理

本节对输出短路期间 SR 的异常应力进行时序分析，为后续的时序优化提供依据。整个过程可分为五个阶段(t0-t5)。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

t0-t1 阶段：t0 时刻，谐振电流与励磁电流相等。由于 SR1 仍处于导通状态，其电流(ISR1)开始过零并反向增大。其中，黑色箭头为参考正方向，红色箭头为实际电流方向。

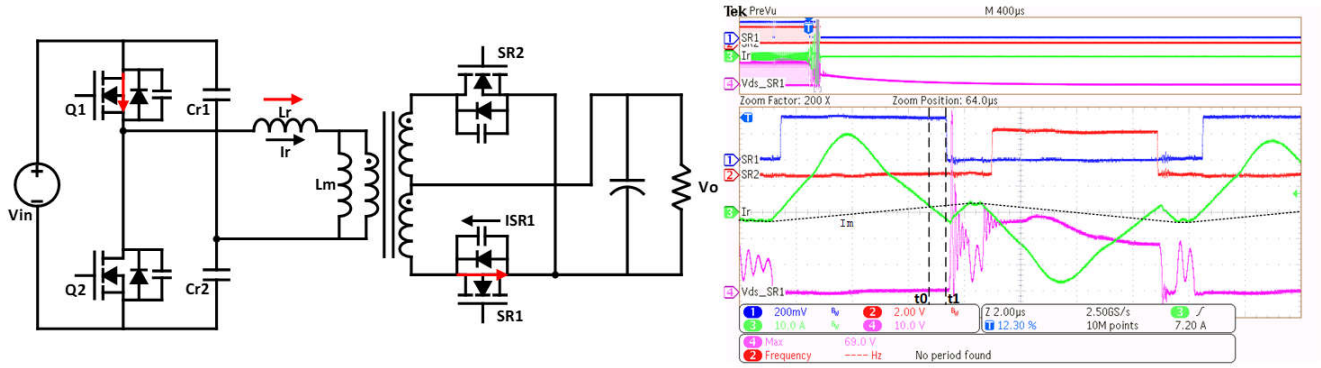


图 1-3. SR 应力异常时序分析阶段一(t0-t1)：电流过零与电流反向

t1-t2 阶段：t1 时刻，由于存在关断延迟，负向电流继续增大。

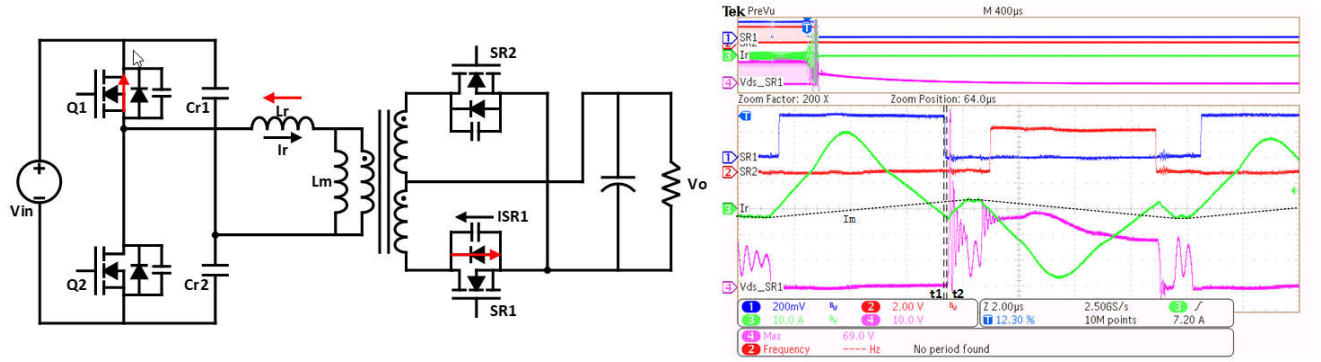


图 1-4. SR 应力异常时序分析阶段二(t1-t2)：关断延迟，负向电流继续增大

t2-t3 阶段：t2 时刻 SR1 完全关断。由于此时负向电流存储的感性能量无处释放，因此迫使电流通过 SR2 体二极管导通续流，此时变压器次级绕组电压钳位。同时原边谐振电感 Lr、折算到次级的漏感 Ls 以及 SR1 的输出电容 Csr 构成谐振回路，谐振频率为 fr1。根据参考设计 PMP40586 的设计参数可知，Csr=4000 pF, n=16, Lr=15 µH, Lm=150 µH，漏感 Ls 估算为励磁电感的 1%，即 Ls = (Lm * 1%) /n²)，可得 fr1 约为 9.912MHz。

$$fr1 = 1/\left[2\pi * sqrt\left(\left(Lr/n^2 + Ls\right) * Csr\right)\right] = 9.912MHz \quad (1)$$

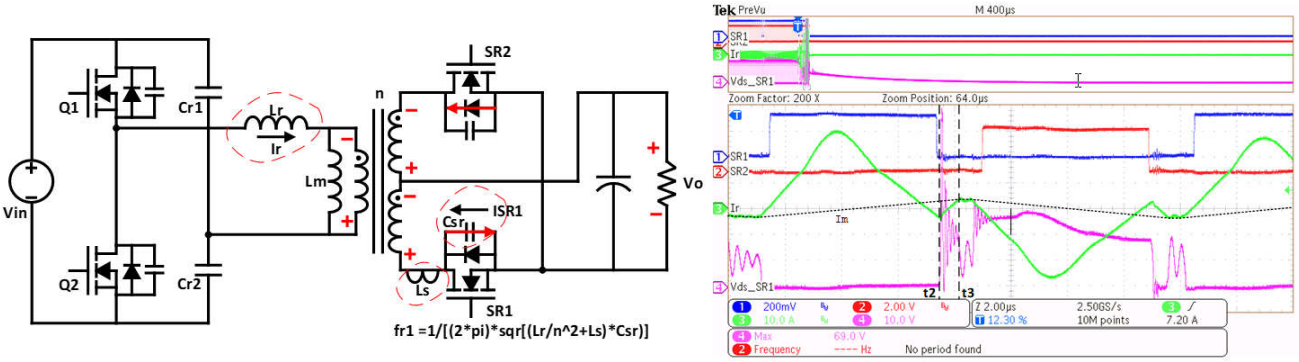


图 1-5. SR 应力异常时序分析阶段三(t2-t3)：绕组钳位与首次谐振(fr1)

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

t3-t4 阶段：t3 时刻，漏感能量释放完毕，变压器绕组电压解除钳位，励磁电感 Lm 开始参与谐振。此时 Lr、Lm、Ls 及 Csr 共同谐振，谐振频率变为 fr2， fr2 约为 3.12MHz。

$$fr2 = 1/\{2\pi * sqrt[(Ls + Lm/n^2 + Lr/n^2) * Csr]\} = 3.12MHz \quad (2)$$

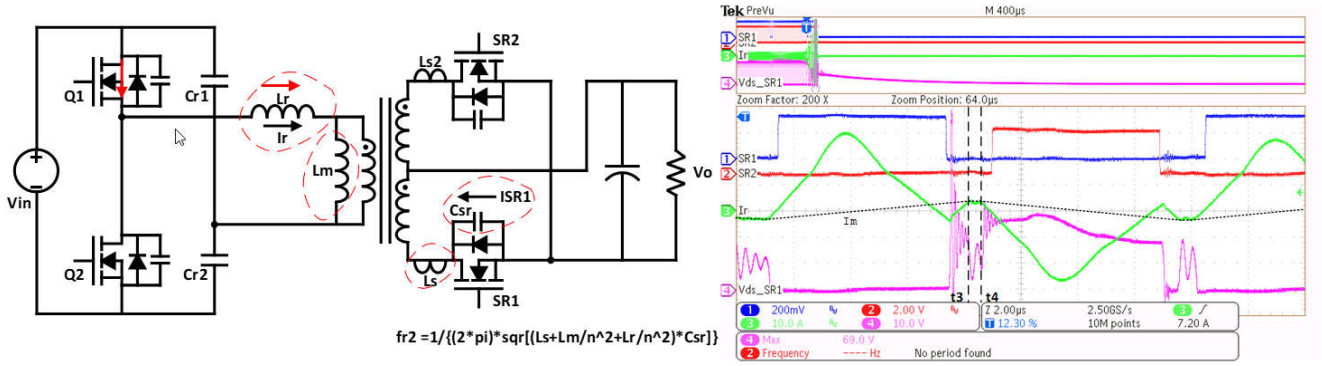


图 1-6. SR 应力异常时序分析阶段四(t3-t4)：励磁电感参与谐振(fr2)

t4-t5 阶段：t4 时刻，原边开关管 Q1 关断，SR2 体二极管再次导通钳位绕组电压，谐振回路恢复为 Lr、Ls 与 Csr，谐振频率为 fr1。

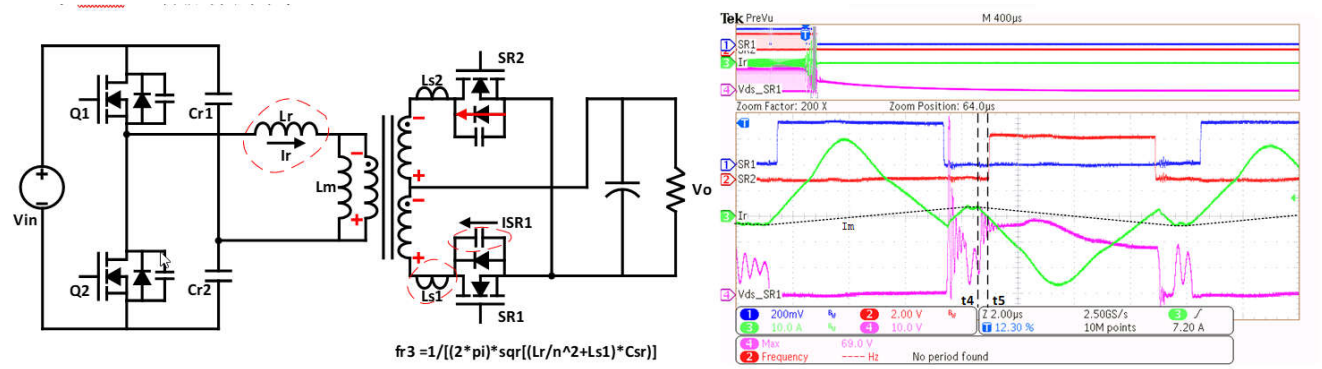


图 1-7. SR 应力异常时序分析阶段五(t4-t5)：原边关断与谐振回归(fr1)

综合分析表明，异常电压应力主要产生于 t2-t3 阶段。其根本原因是：输出短路后，SR 未能在电流过零前及时关断，导致产生较大的负向电流。当 SR 关断时，该负向电流对应的漏感能量通过与 SR 寄生电容的谐振过程释放，从而在 SR 两端产生高压尖峰。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2 解决方案：基于 UCD3138 自动模式切换的 SR 应力优化

针对上述分析，解决问题的关键在于防止负向电流流过 SR。传统通过软件调整 SR 导通时间的方法响应较慢，无法及时响应。本文提出一种基于 UCD3138 自动模式切换(Automatic Mode Switching) 功能的硬件解决方案，可在检测到短路时快速调整 SR 的动作。

2.1 关键技术：UCD3138 自动模式切换(Automatic Mode Switching)功能原理

UCD3138 的 DPWM 模块配置可由多组寄存器控制。如 图 2-1 所示，Control Register 0、Auto Config Mid 和 Auto Config High 寄存器组均包含 DPWM 参数。当启用自动模式切换功能后，系统将根据实时环路的大小(Filter Duty 值)，在这三组配置间自动切换。

为实现平滑切换并防止振荡，功能内置滞回比较器。共有四个阈值点：

- 当 Filter Duty 值增加时，切换点由 High-Lower Threshold 和 Low-Lower Threshold 决定。
- 当 Filter Duty 值减小时，切换点由 High-Upper Threshold 和 Low-Upper Threshold 决定。

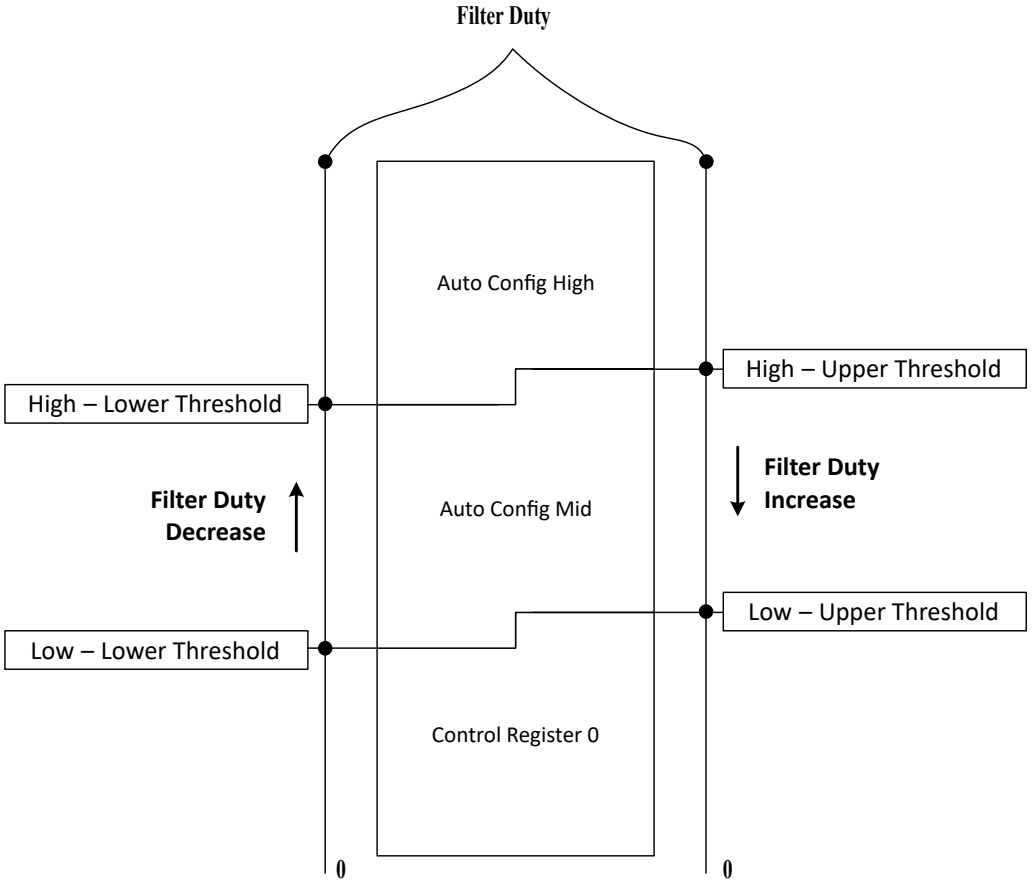


图 2-1. UCD3138 自动模式切换(Automatic Mode Switching)机制示意图

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2.2 方案实现：利用模式切换动态调整 SR 导通时间的控制时序

本方案利用 UCD3138 自动模式切换功能，为 SR 设置不同的工作模式，如 图 2-2 所示：

- 轻载/待机模式(Filter Duty < Low-Lower Threshold)：DPWM 由 Control Register 0 配置，SR 被设置为关闭状态。
- 正常运行模式(Low-Lower Threshold < Filter Duty < High-Lower Threshold)：DPWM 切换至由 Auto Config Mid 寄存器组配置。此时，SR 最大导通时间被设置为 Time1(通常接近且略小于半个谐振周期)，以实现高效率的同步整流。
- 输出短路/过载模式(Filter Duty > High-Lower Threshold)：当输出发生短路，环路迅速调整导致 Filter Duty 急剧增大。一旦超过 High-Lower Threshold，DPWM 配置立即切换至 Auto Config High 寄存器组。在此模式下，可将 SR 最大导通时间设置为一个更小的值 Time2。

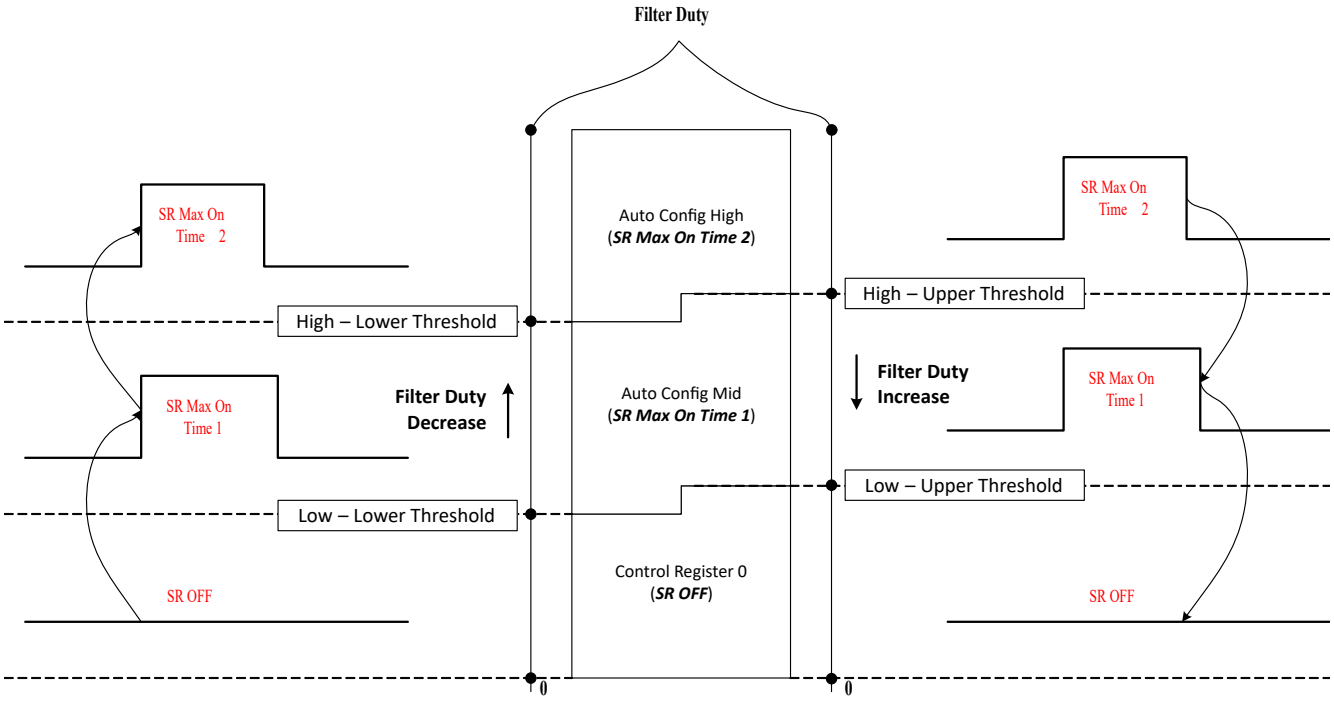


图 2-2. 用于 SR 控制的自动模式切换寄存器配置关系图

图 2-3 所示为 SR 应力优化方案时序图，在输出短路前，此时 SR 处于正常运行模式，其导通时间由 Auto Config Mid 寄存器组配置，导通时间为 Time1，当输出短路发生后，此时环路输出(Filter Duty)快速增大，当 Filter Duty 大于设定的切换阈值 High-Lower Threshold 后，SR 将处于输出短路/过载模式，其导通时间也将切换为 Auto Config High 寄存器组控制，导通时间为 Time2。 其核心机制为：通过合理设置 Time2，使得在输出短路工况下，SR 的驱动信号在谐振电流过零变为负向之前就被强制关断（如 图 3-3 所示）。由于 SR 在电流反向前已关断，因此可以从根本上杜绝负向电流的产生，从而避免了因漏感能量谐振释放导致的电压应力问题以及可能的失效风险。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

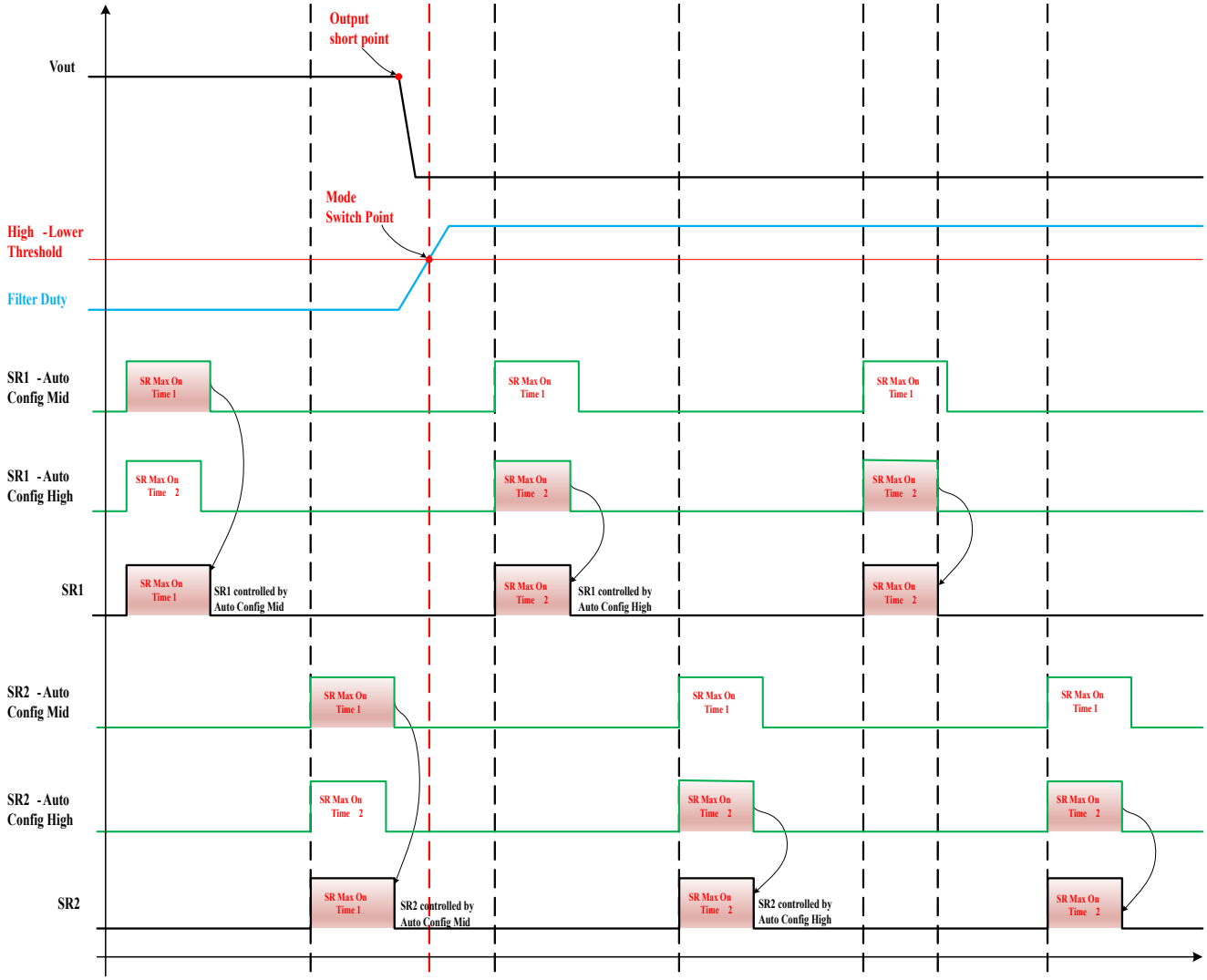


图 2-3. 基于自动模式切换的 SR 应力优化方案时序图

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3 实验验证：优化方案的有效性测试

为验证上述方案，在 PMP40586 参考设计平台上进行了测试。

3.1 结果对比：SR 应力从 69V 降至 29.6V

为验证上述方案的有效性，在 PMP40586 参考设计平台上进行了测试。图 3-1 展示了采用自动模式切换功能优化后的输出短路测试波形。可以看到，SR 两端的最大电压应力被限制在 29.6V，与优化前的 69V (图 1-2) 相比，应力大幅降低，处于器件安全工作范围内。

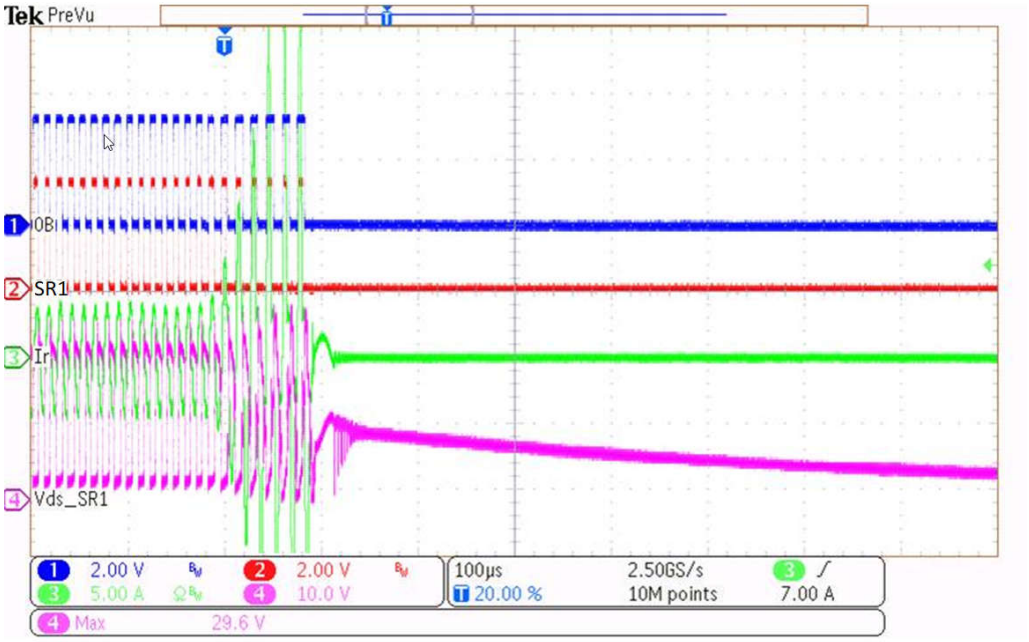


图 3-1. 采用优化方案后输出短路的 SR 应力波形

3.2 波形分析：SR 导通时间动态切换与提前关断

图 3-2 的波形清晰地显示了短路事件发生后，SR 的导通时间从 Time1 切换到 Time2 (黑色虚线框内)，证实了自动模式切换功能的快速响应与执行。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

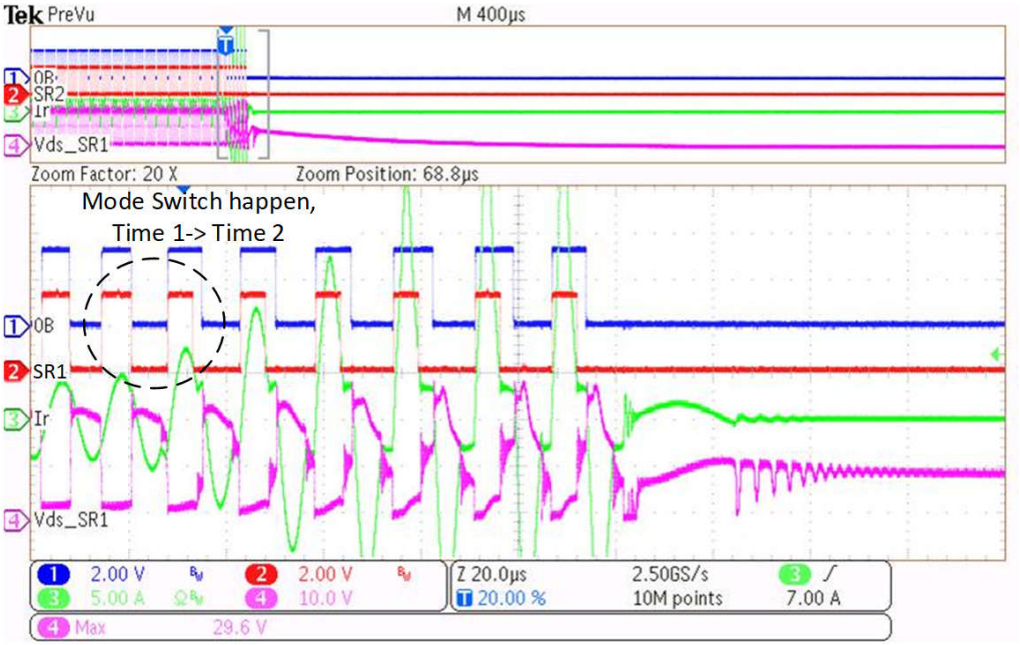


图 3-2. 自动模式切换实现 SR 最大导通时间动态切换波形

图 3-3 则直观展示了 SR 驱动信号提前关断的细节，如波形所示该方案成功避免了负向电流的产生，印证了所提方案的有效性。

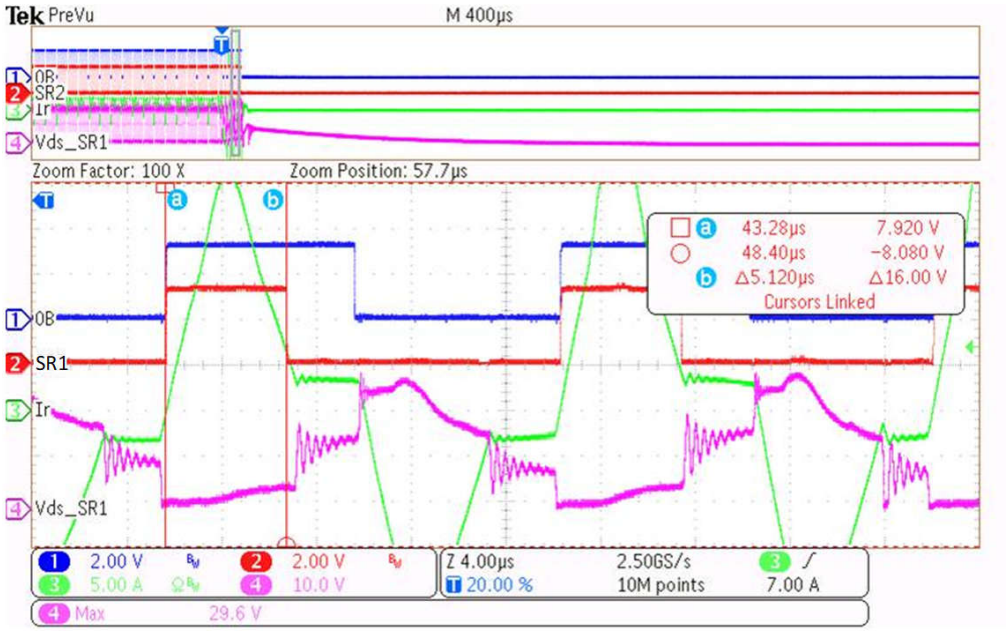


图 3-3. SR 驱动提前关断以避免负向电流的示意波形

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4 总结

本文深入分析了 LLC 变换器在输出短路时，由于 SR 负向电流引起的应力问题的机理。提出并实现了一种基于 UCD3138 自动模式切换功能的创新硬件解决方案。该方案通过监控环路信号，在检测到短路时利用硬件快速切换 DPWM 配置，动态缩减 SR 最大导通时间，迫使 SR 在电流过零前关断，从而消除了负向电流及其衍生的电压应力。实验证明，本方案能实现单开关周期响应，将短路应力从 69V 降至 29.6V，为高可靠性 LLC 变换器的短路保护设计提供了有效且实用的参考。

5 参考文档

1. UCD31xx Digital Power Supply Controller Family - Technical Reference Manual.
2. Reference design - PMP40586.

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

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出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