

ESS 中的双向 CLLLC 谐振转换器的控制方案



Guangzhi Cui

简介

诸如双向电容-电感-电感-电容 (CLLLC) 的单级隔离式转换器，是储能系统 (ESS) 中常见的转换器类型，用于节省系统成本并提高功率密度。CLLLC 的增益曲线更平坦，但是当开关频率 (f_s) 高于串联谐振频率 (f_r) 时，增益曲线会变得过度平坦。变压器和 MOSFET 的寄生电容也会显著影响转换器增益[1]，这将导致转换器的输出电压超出稳压范围。在本期电源设计要点中，我将介绍一种 CLLLC 控制算法和一种同步整流器 (SR) 控制方法，以消除这种非线性，并使用 3.6kW 原型转换器来验证性能。图 1 是住宅 ESS 的方框图。

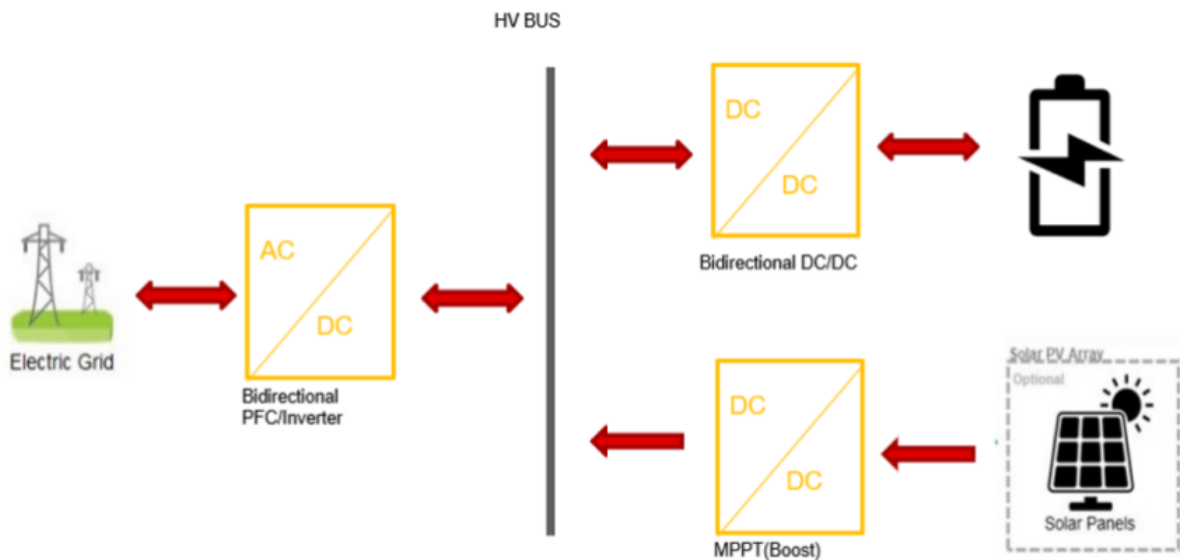


图 1. 具有双向功率因数校正 (PFC)/逆变器、双向 DC/DC 转换器和最大功率点跟踪 (MPPT) 的住宅 ESS 方框图。来源：德州仪器 (TI)

控制级中的设计注意事项

图 2 展示了具有寄生电容器的全桥 CLLLC 谐振转换器的电路拓扑。此拓扑由对称谐振回路和全桥结构组成。

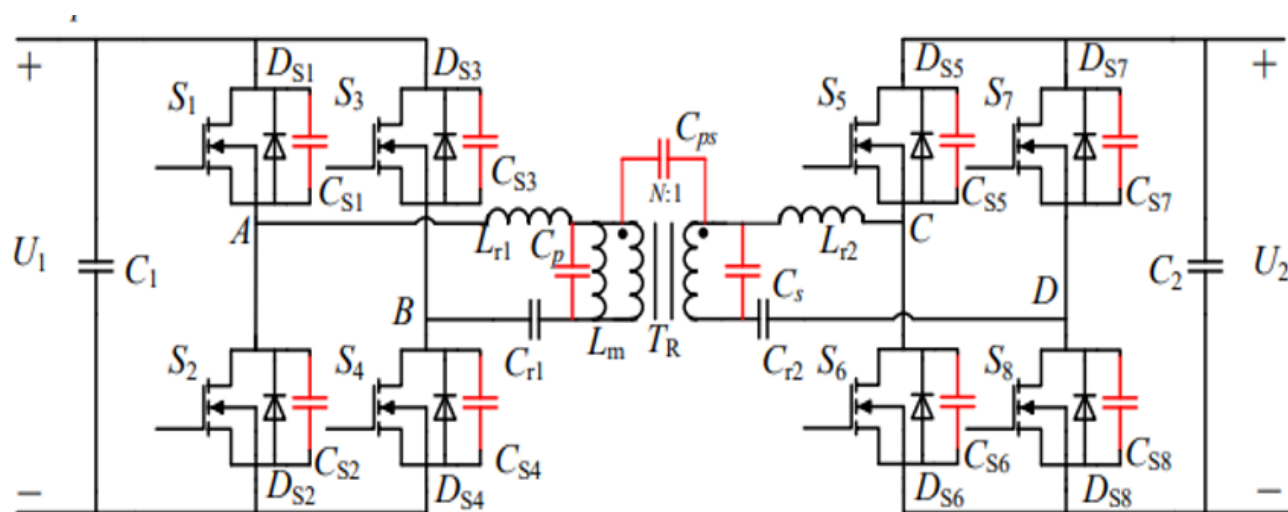


图 2. 具备寄生电容器的全桥 CLLLC 转换器的电路拓扑。来源：德州仪器 (TI)

图 3 展示了 CLLLC 的理想增益曲线。与 LLC 转换器类似，变频控制是适用于 CLLLC 谐振转换器的常用控制方案。

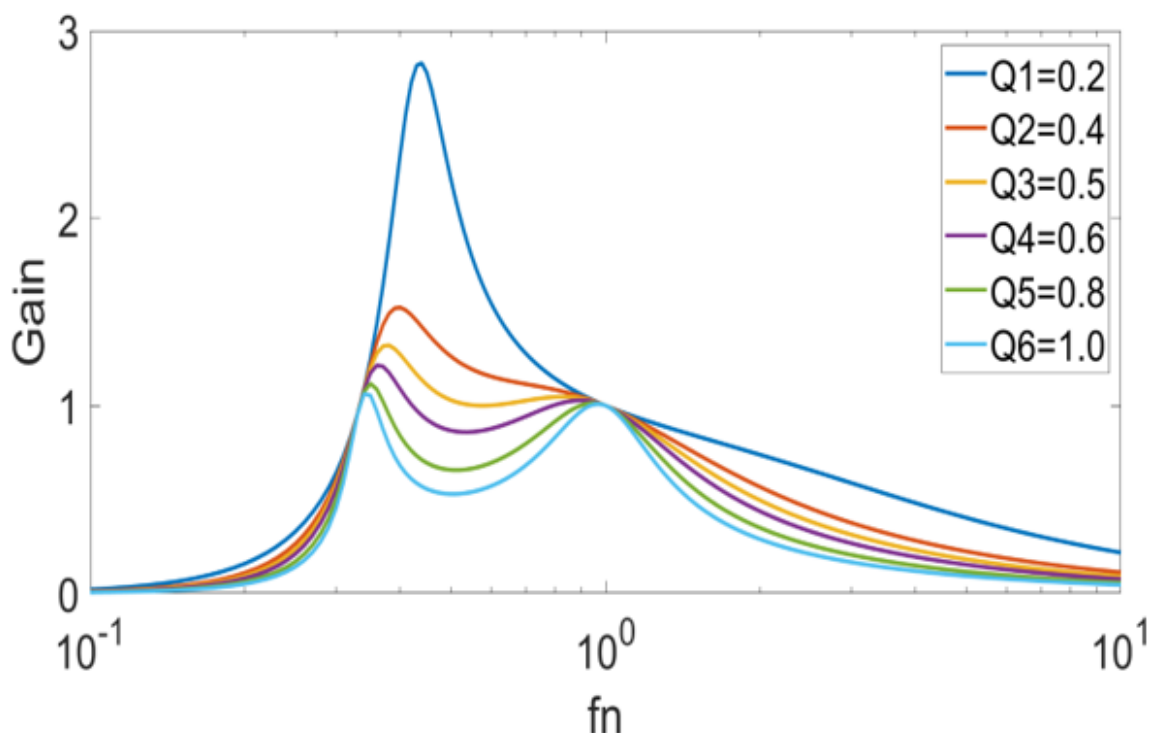


图 3. 使用变频控制的理想 CLLLC 增益曲线。来源：德州仪器 (TI)

如前所述，当 f_s 超过 f_r 时，增益曲线是平坦的。此外，随着功率等级增加，转换器需要在电池侧并联更多 FET 以处理更大的电流，这意味着输出全桥 FET 上的输出电容 (C_{oss}) 将非常大。考虑到变压器绕组间电容和 C_{oss} 的寄生参数，高频率下的非单调增益曲线现象明显，这一现象与轻载条件相对应，如图 4 所示。

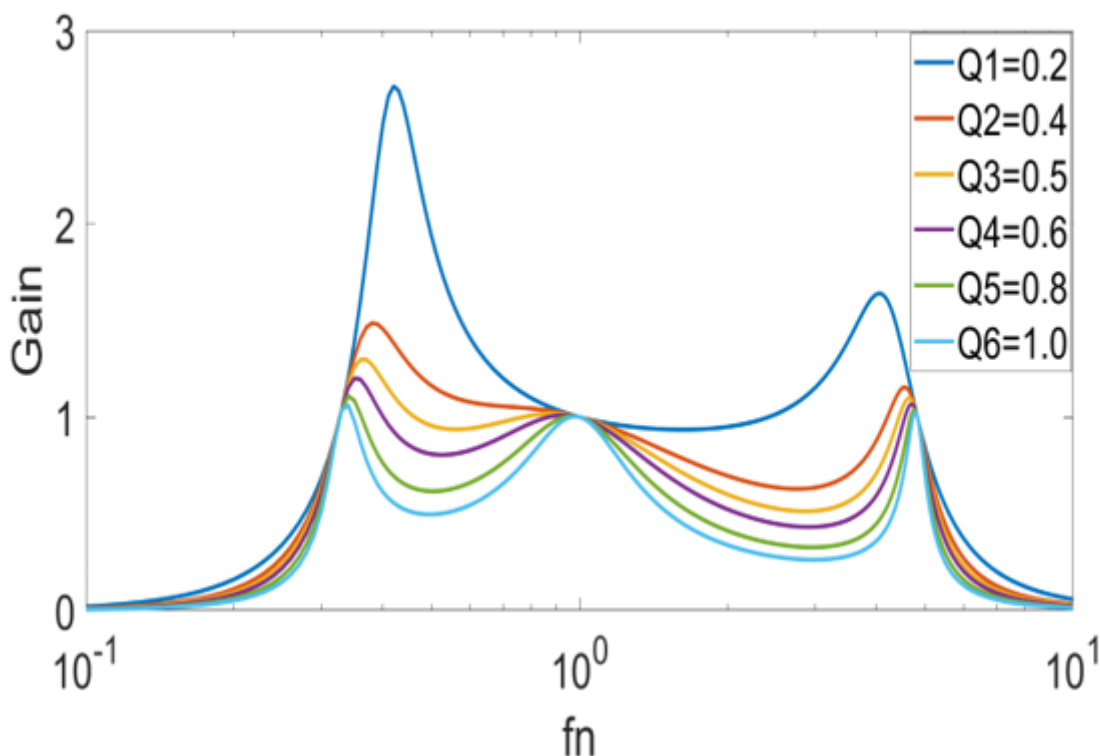


图 4. 考虑寄生参数的 CLLLC 增益曲线，例如变压器绕组间电容和 C_{oss} 。来源：德州仪器 (TI)

在这种情况下，频率控制没有作用。打嗝模式是一种解决 CLLLC 谐振转换器非单调特性的常用方法，但该方法不适用于电池应用，因为转换器需要在电池电压较低时提供高电流。脉宽调制 (PWM) 和相移控制可以解决该问题，但 PWM 控制将使晶体管在硬开关状态下工作，导致效率降低且工作频率受到限制。因此，相移控制是更好的选择。

控制逻辑

图 5 展示了频率和相移混合控制的方案图表。启动期间电池电压较低，因此转换器需要使用低充电电流进行软启动，以便限制高电流峰值并延长电池寿命。如果谐振电感值或频率不够高，则在高频下软启动的效果有限。当电池充电至接近满电量时，它将以小电流涓流充电并保持恒定电压。这两种情况都对应于转换器的轻负载条件。在轻负载条件下，输出电压往往会因寄生电容而上升，并最终可能根据之前的分析超出稳压范围；相移控制有助于在此状态下调节输出电压。控制器的计算结果决定了转换器是否需要进入相移模式。

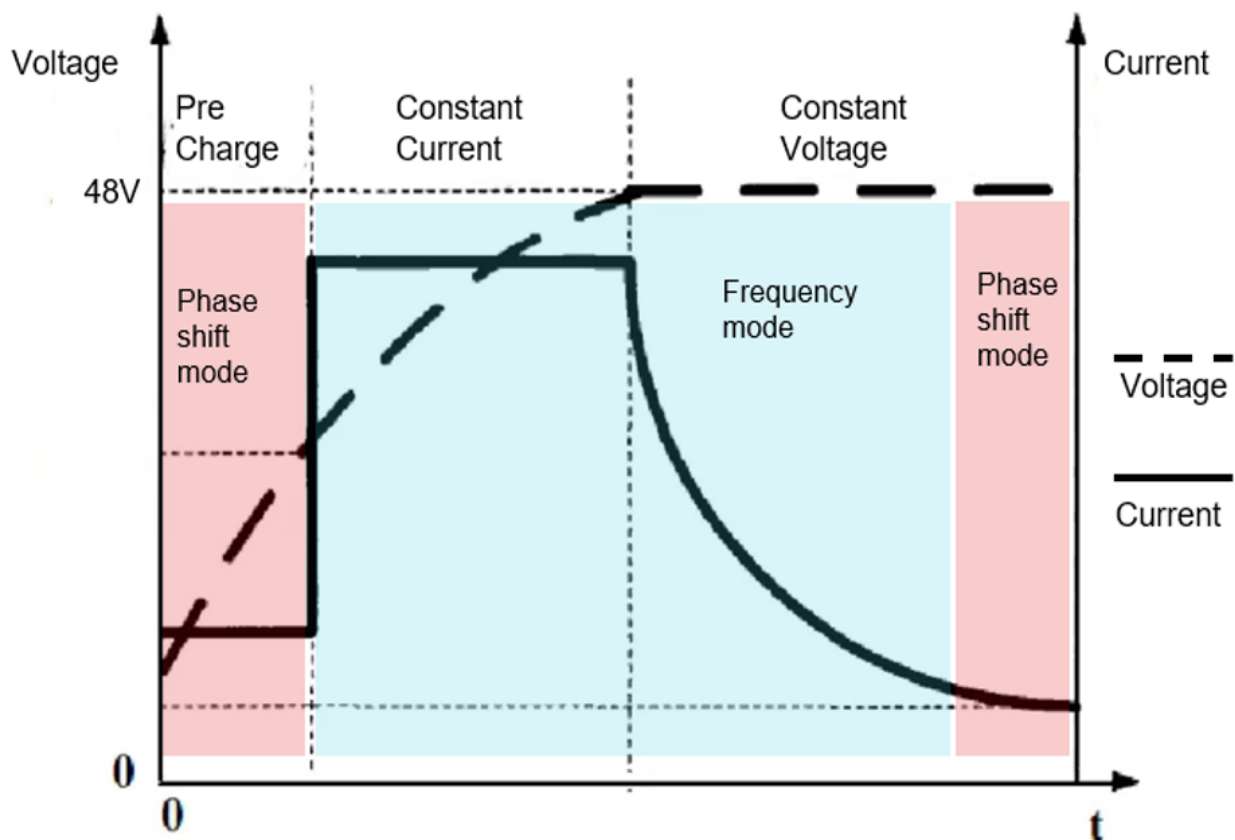


图 5. 不同充电状态下的控制方案。请注意，启动期间电池电压较低，因此转换器需要以低充电电流进行软启动，以限制电流尖峰并延长电池寿命。来源：德州仪器 (TI)

图 6 展示了频率和相移之间的调制切换。当负载降低时，频率将增加以调节输出电压。如果计算得出的最大频率高于设置值，转换器将进入相移调制；当负载增加时，相移角将减小以便调节输出电压。当相移角降至零时，转换器将再次进入频率模式。

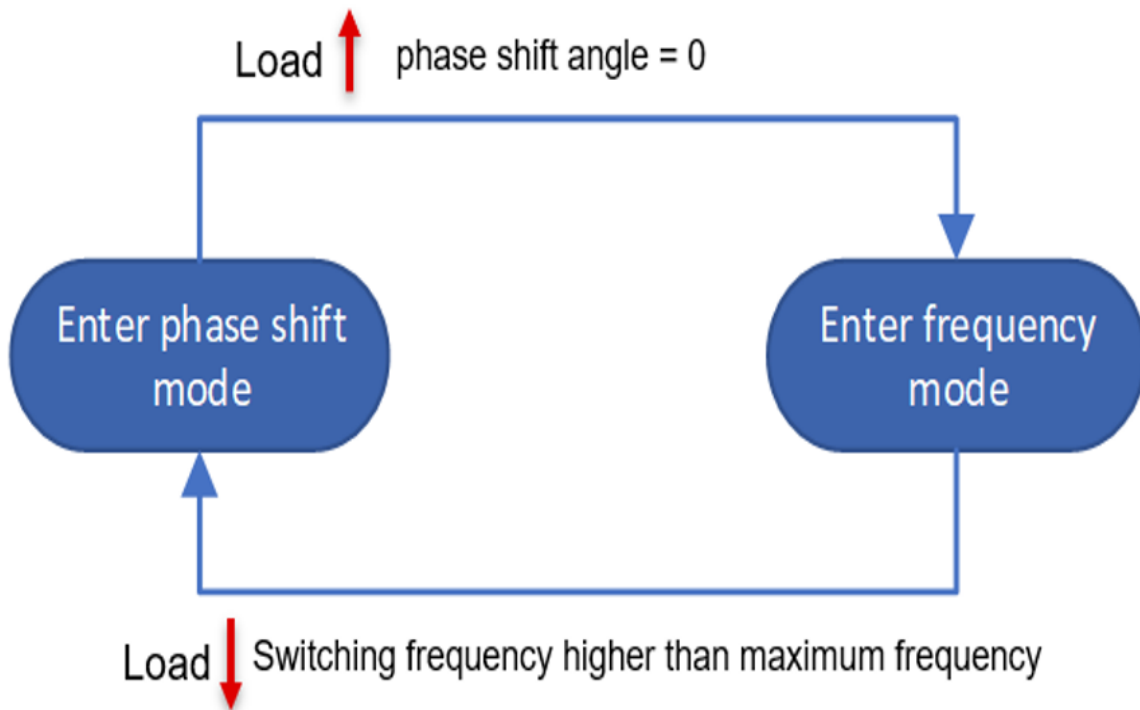


图 6. 频率与相移模式之间的控制方案。当负载减小且相移角为零时，频率将增加以调节输出电压（频率模式）。
 如果最大频率高于设置值，则相移角会减小以调节输出电压（相移模式）。来源：德州仪器 (TI)

寄生电容引起的一些问题

MOSFET 的 C_{oss} 在相移模式下也会产生这种影响；槽电流将与这些电容器一起振荡，如 图 7 所示。

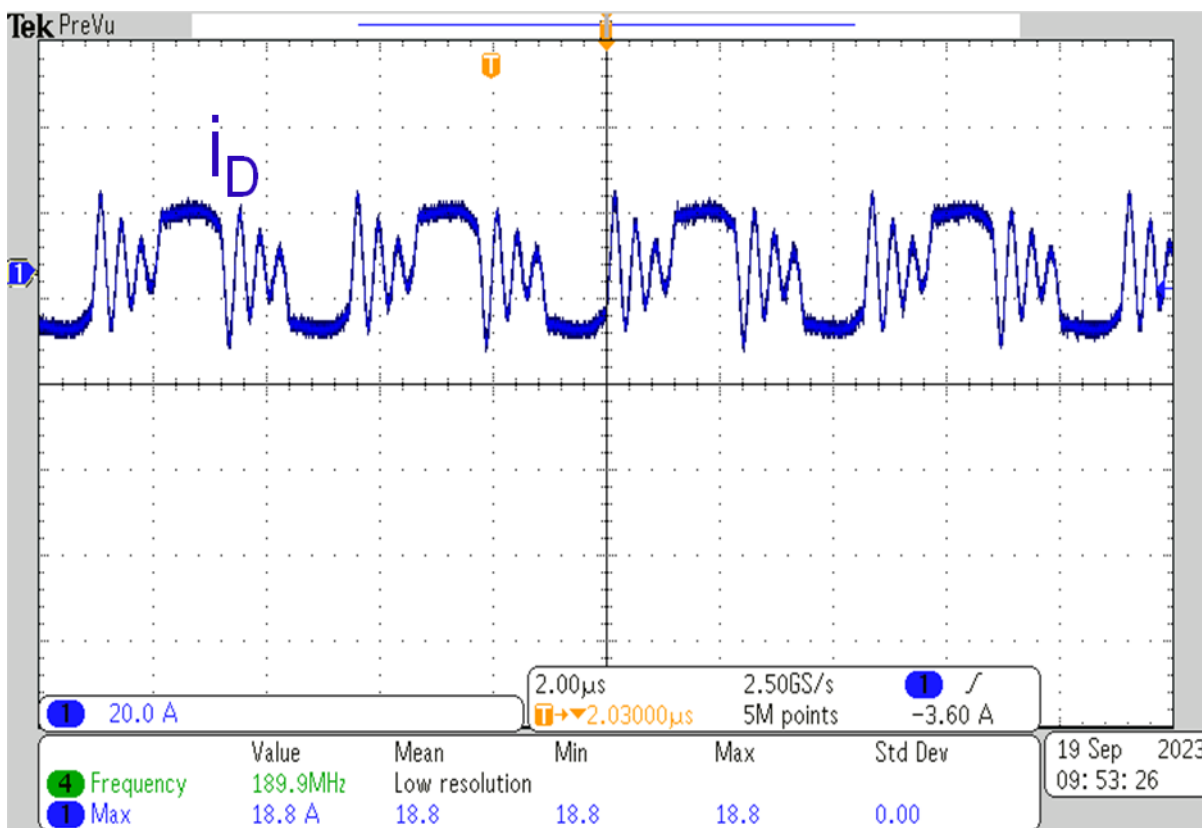


图 7. 开环相移模式下的槽电流波形。来源：德州仪器 (TI)

图 8 绘制了在考虑和不考虑 MOSFET C_{oss} 的情况下，CLLLC 转换器的增益比较图。根据图中所示，增益曲线中会出现波动。在这种情况下，控制器可能会在闭环控制下将相移角调整到错误方向，从而导致较大的电流峰值。

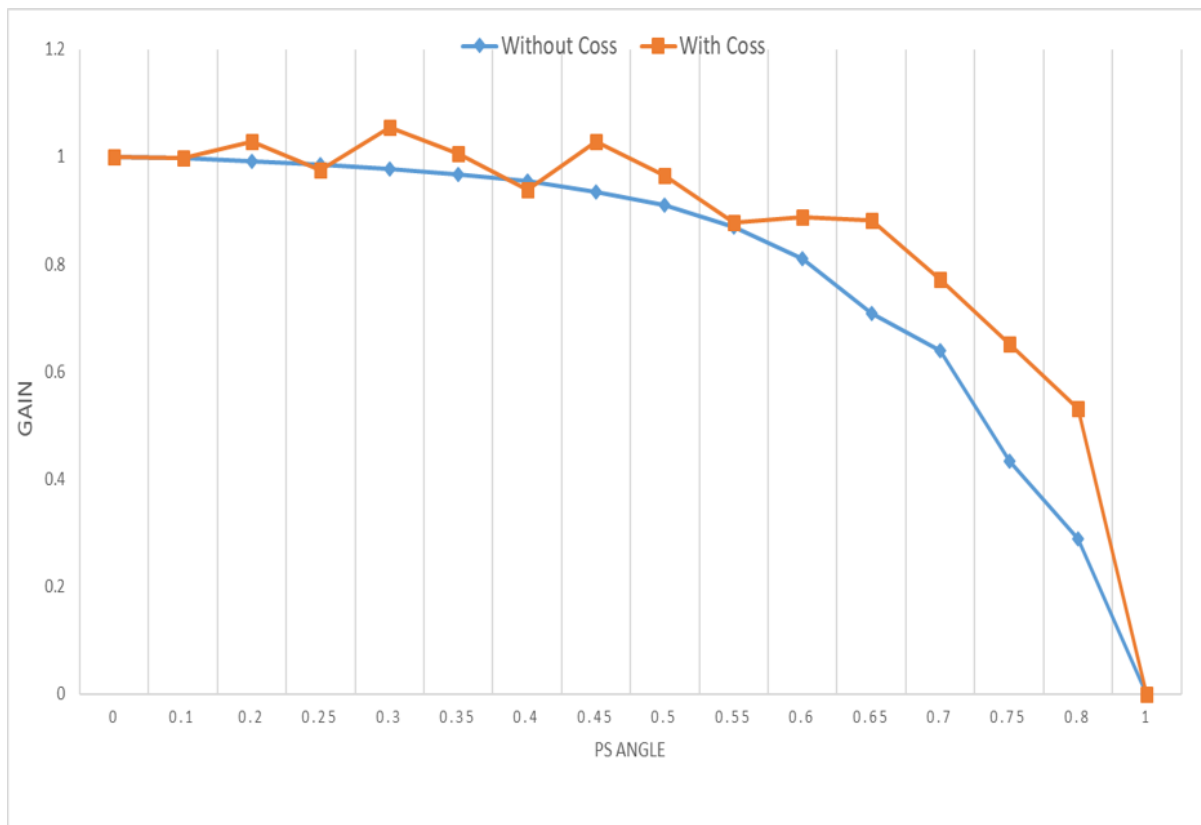


图 8. 使用和不使用 C_{oss} 时相移模式下的增益曲线。来源：德州仪器 (TI)

增益问题解决方案

为了消除增益的非单调性，采用图 9 中所示的 SR 控制可以解决这个问题。在谐振回路电流振荡期间，同时导通两个上部或两个下部 SR 开关会暂时短接变压器的次级绕组，因此 C_{oss} 不会参与谐振。

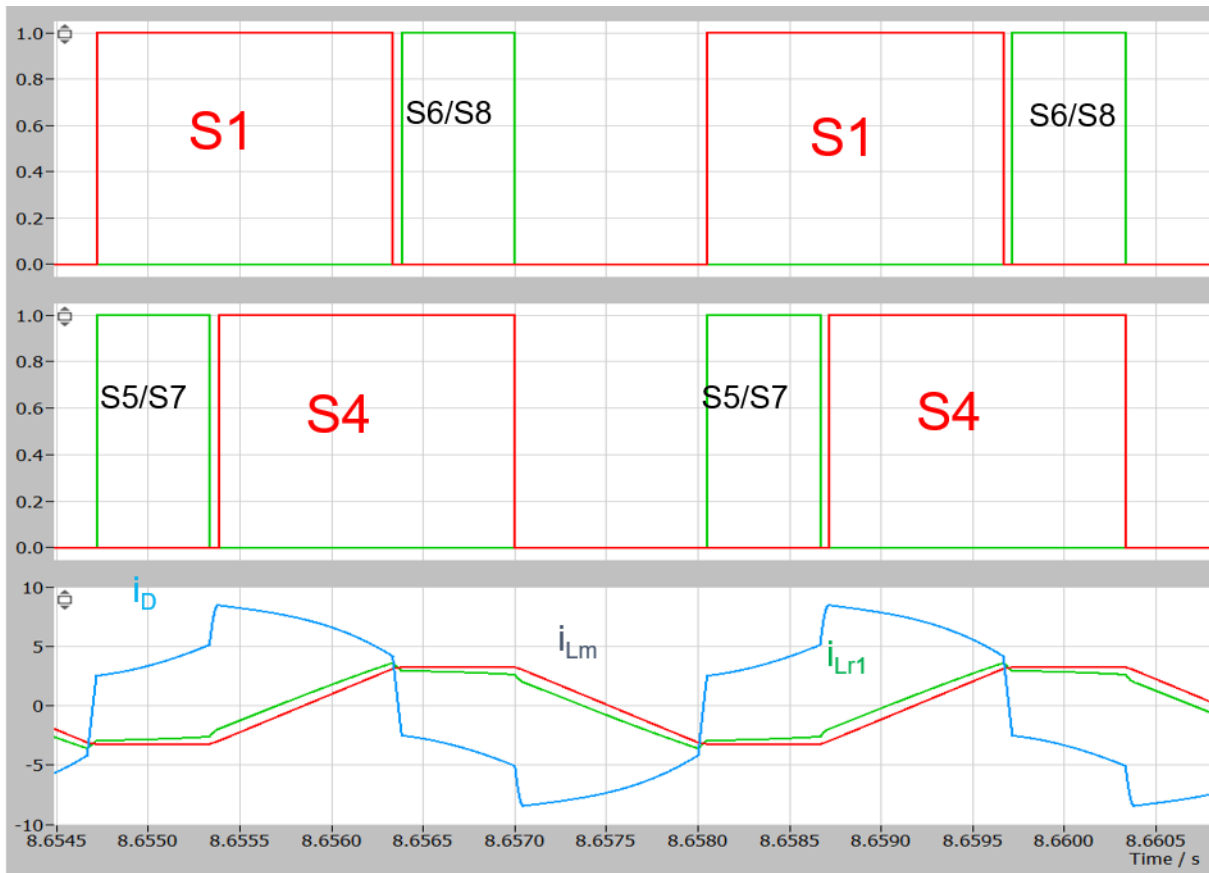


图 9. 提出的用于消除增益非单调性的 SR 控制方案。来源：德州仪器 (TI)

图 10 展示了测试结果；与图 8 相比没有产生振荡。有关更详细的分析和测试结果，请参阅参考[2]。

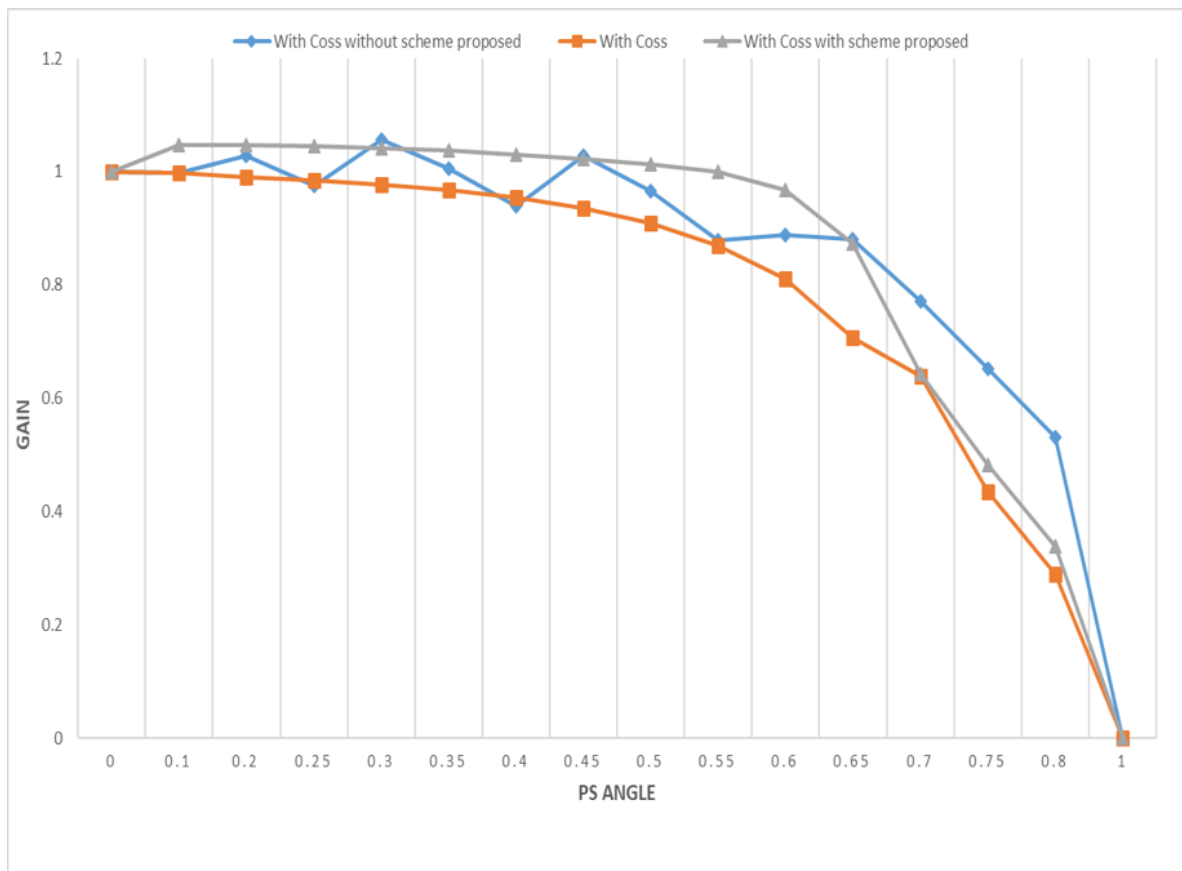


图 10. 使用建议的控制方案 (灰线) 时相移模式下的增益曲线。来源：德州仪器 (TI)

实验结果

原型[3]使用此控制方案来验证性能。图 11 显示了软启动波形，图 12 显示了使用建议的控制方案时，在相移模式下的谐振回路电流波形。

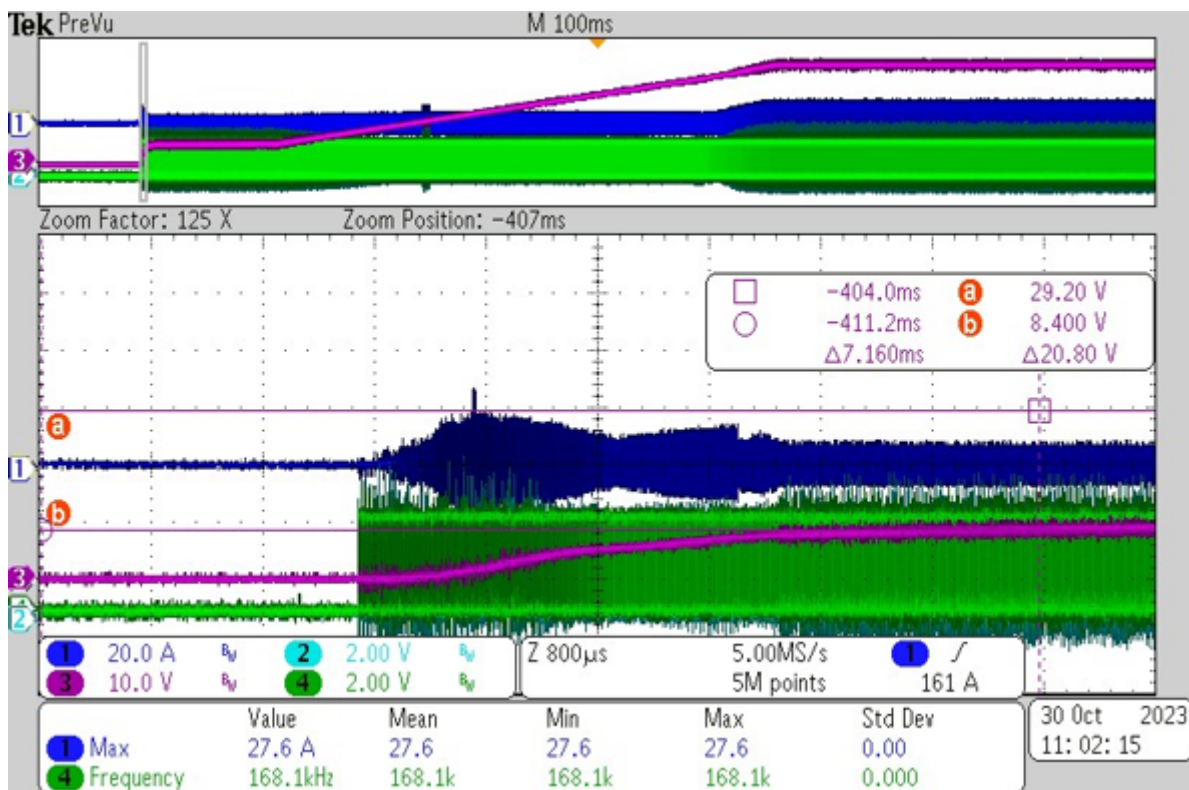


图 11. 相移软启动，输出功率为 750 W。来源：德州仪器 (TI)

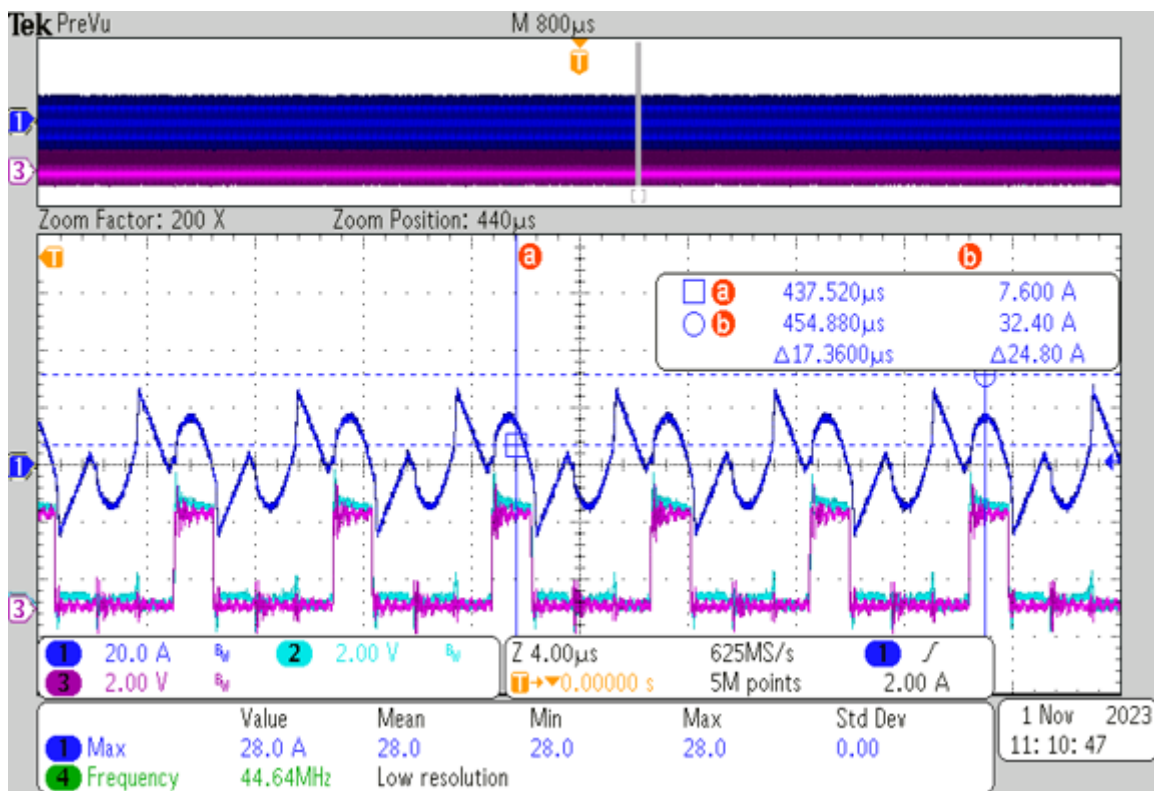


图 12. 使用建议方案时，相移模式下的谐振回路电流波形。来源：德州仪器 (TI)

图 13 和 图 14 展示了频率/相移调制开关测试。根据测试波形，启动电流限制在 28A 以内，输出功率为 750W。谐振回路电流不会出现振荡，并且转换器可以在不同的工作条件下平稳地更改调制。

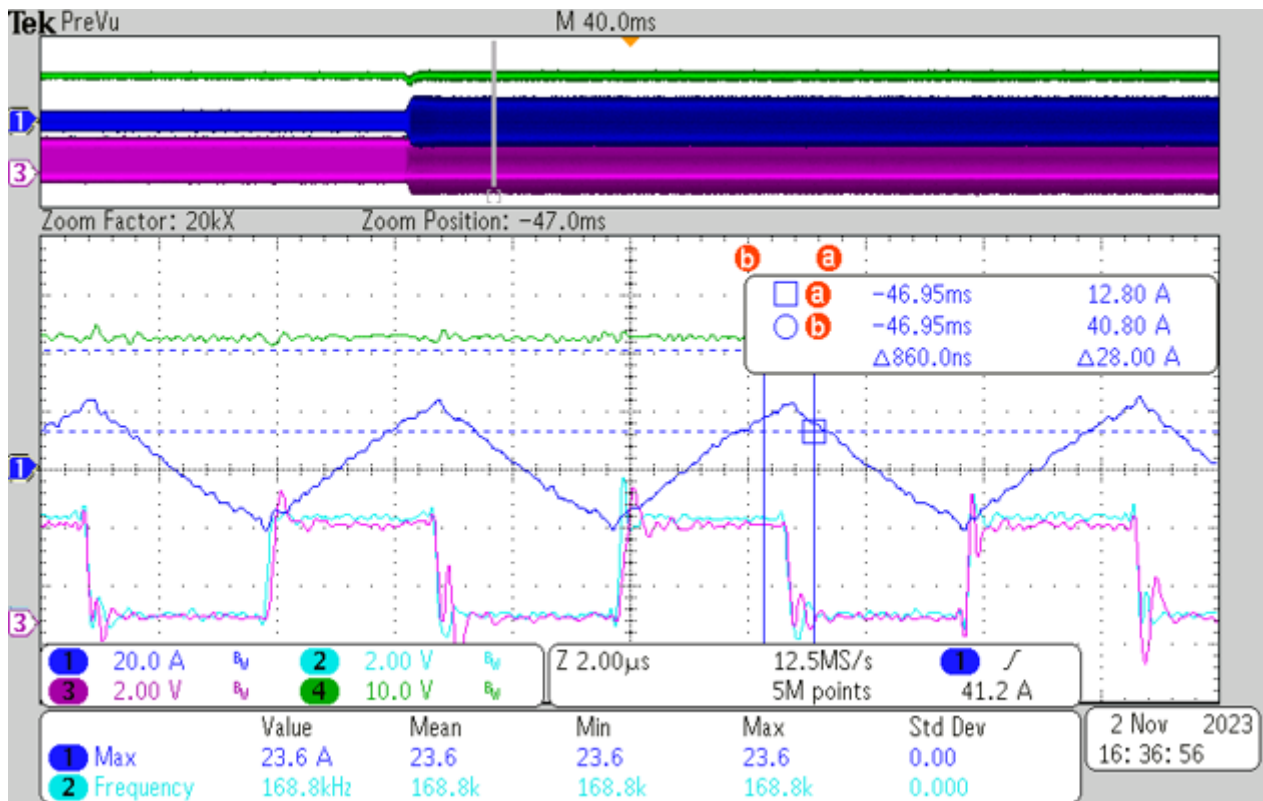
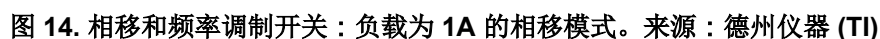


图 13. 相移和频率调制开关：5A 负载的频率模式。来源：德州仪器 (TI)



建议的频率和相移混合控制方案限制了启动阶段的浪涌电流，并使增益在轻负载条件下呈线性。转换器可以在频率调制和相移调制之间平稳切换。此外，相移控制还会引入非单调增益问题，并使具有较大 C_{OSS} 的设计中的电流出现振荡。建议的 **SR** 控制方法有助于解决电流振荡问题并使增益保持单调。

- 电源技巧 102：用于 EV 车载充电器的 CLLLC 与 DAB 比较
- 电源技巧 92：高频谐振转换器设计注意事项第 2 部分
- 电源技巧 134：别用复杂方式切换，可通过 PWM 全桥实现 ZVS
- 电源技巧 117：在完全工作条件下进行测试之前测量 LLC 谐振回路
- 电源技巧 97：构造 LLC-SRC 增益曲线以满足电池充电器需求
- 电源技巧 94：反向降压拓扑如何替代非隔离反激式拓扑

参考资料

1. Lee、Byoung-Hee、Moon-Young Kim、Chong-Eun Kim、Ki-Bum Park 和 Gun-Woo Moon，“[Analysis of LLC Resonant Converter Considering Effects of Parasitic Components](#)”。发表于 INTELEC 2009 — 第 31 届国际电信能源会议，韩国仁川，2009 年 10 月 18-22 日，第 1-6 页。
2. Tai、Will、Guangzhi Cui 和 Sheng-Yang Yu，“[Gain Optimization Control Method for CLLLC Resonant Converters Under Phase Shift Mode](#)。”发表于 PCIM Europe 2024；电力电子、智能运动、可再生能源和能源管理国际展览与会议、德国 Nürnberg，2024 年 6 月 11 - 13 日，第 2513 - 2518 页。
3. Cui、Guangzhi。n.d. “[3.6kW 双向 CLLLC 谐振转换器参考设计](#)”。德州仪器 (TI) 参考设计编号 PMP41042。2024 年 11 月 6 日访问。

先前已发布于 EDN.com 上。

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

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、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。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司