



摘要

瞬态响应是功率转换器设计中的一项重要性能指标，它描绘了转换器如何响应负载电流的突然变化。该指标对于满足动态负载条件下的电压调节要求很重要，并且通常需要大容量输出电容来限制输出电压偏差。瞬态响应取决于转换器的环路响应，其中，带宽和相位裕度会影响转换器对瞬态事件的响应速度，以及输出电压的稳定时间行为。LLC 转换器中使用的传统频率控制方法很难补偿，并且带宽有限。混合迟滞控制 (HHC) 是一种创新的控制方法，通过将 LLC 功率级简化为单极点系统（这样更易于补偿并获得更高的带宽），并实现出色的瞬态性能。这种控制策略旨在以必要但最小化的大容量输出电容大小来满足给定的电压调节要求，由此缩减 BOM 数量并减小解决方案尺寸，为系统带来优势。

内容

1 简介.....	2
2 瞬态响应的重要性.....	2
3 直接频率控制与混合迟滞控制.....	3
4 瞬态响应比较.....	5
5 参考文献.....	6
6 修订历史记录.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

瞬态响应是电源设计中的一项性能指标，它描绘了电源如何响应输出负载电流的突然变化。理想情况下，功率转换器的输出在负载阶跃期间几乎没有变化。但在实际应用中，会遇到输出电压出现一定变化的情况。在分析功率转换器的瞬态响应时，必须考虑许多重要因素，例如输出电压的最大偏差、输出电压恢复到其调节设定点所需的时间以及输出电压的稳定行为。图 1 所示为一个瞬态响应示例

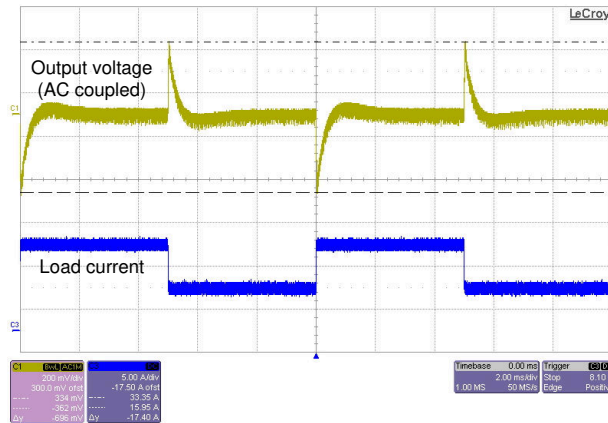


图 1-1. 瞬态响应示例

图 1-1 如所示，当负载电流突然增加时，输出电压会下降，因为转换器控制环路无法立即响应增加的负载需求。因此，输出电容将向负载提供额外的电荷，并且输出电压会降低。控制环路最终会对此行为做出响应，并使输出电压恢复到其调节后的设定值。当负载电流急剧下降时，也会观察到类似的行为。由于转换器控制环路无法立即响应降低的负载，因此多余的电荷会积聚在输出电容上，并且输出电压会升高。输出电压恢复到其调节后的设定值所需的时间称为“稳定时间”。另外，我们会希望以平滑的方式将输出电压恢复到调节电压并实现最小的振铃。

2 瞬态响应的重要性

良好的瞬态响应是电源设计的关键要素，它会以多种方式影响设计选择。设计功率转换器时，很重要的一点是确保在预期的最坏瞬态负载条件下使输出电压保持在所需调节范围内。严重的输出电压偏差会导致后续的设备故障甚至停机。

瞬态响应与功率转换器的环路响应直接相关。控制环路的带宽决定了转换器对瞬态事件的响应速度。带宽更高则响应时间更短。此外，建立时间的行为受到控制环路相位裕度的影响。相位裕度不足会导致欠阻尼的响应，并在输出电压中引起振铃。为最大限度地降低出现瞬态状况而导致运行不稳定的可能性，强烈建议采用最小为 45° 的相位裕度。大容量输出电容对于限制输出电压的偏差也很重要。更大的输出电容有助于减小输出电压偏差，但是，最好能够限制为了最小化成本和解决方案尺寸所需要的大容量电容的大小。

3 直接频率控制与混合迟滞控制

LLC 谐振转换器的常规控制方法是直接频率控制 (DFC)，这种方法中的开关频率由电压环路输出直接确定。图 3-1 图 2 为 DFC 的简化方框图。

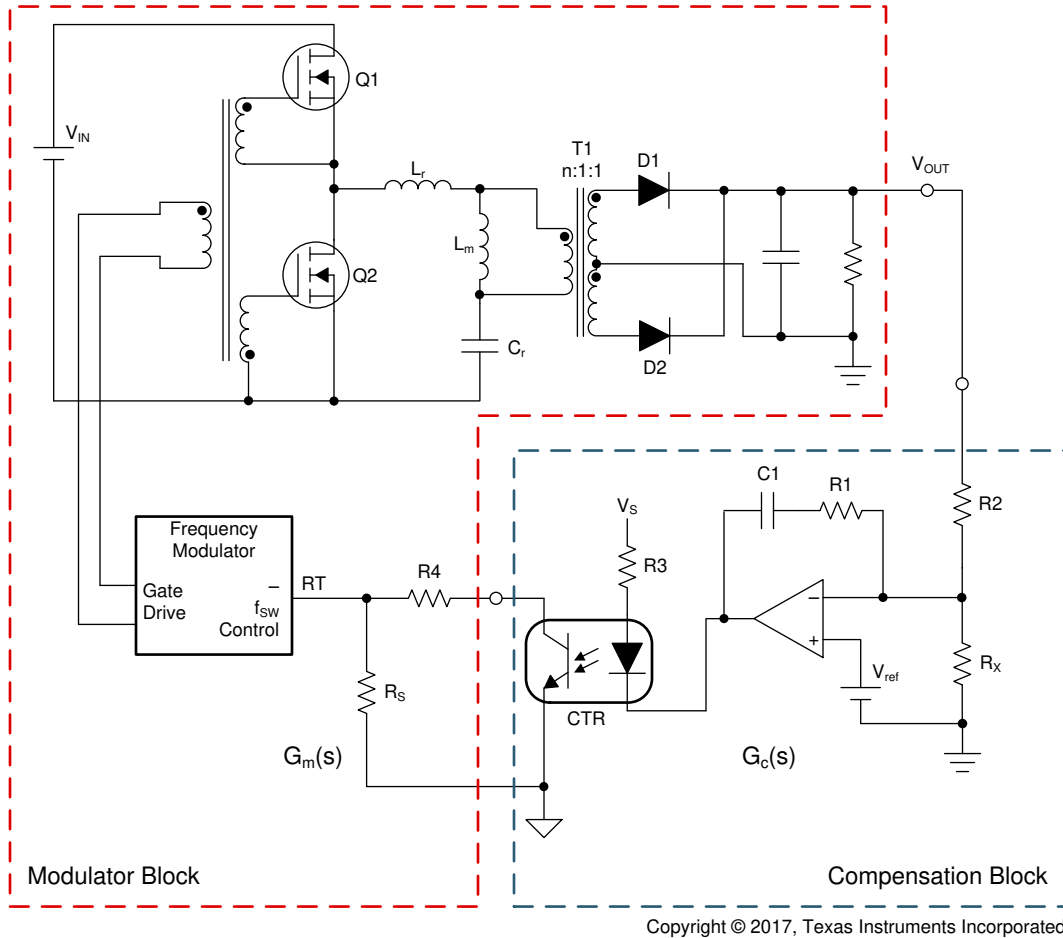
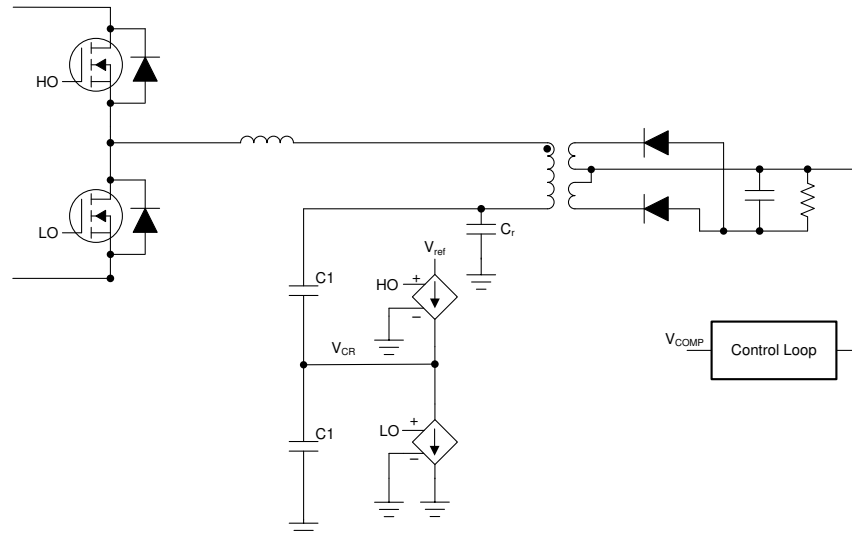


图 3-1. DFC 方框图

采用 DFC 时，补偿模块提供的反馈用于确定适当的栅极驱动信号频率。开关频率的调整会修改调制器模块的增益，目标是调整增益以实现所需的输出电压。这种方法已经过验证，但由于调制器传递函数的复杂性及其对 LLC 工作点的依赖性而难以补偿。为了实现理想的补偿，会需要复杂的计算建模和迭代实验。

UCC25640x 中采用了一种称为混合迟滞控制 (HHC) 的创新型控制方法。HHC 结合使用了频率控制和电荷控制。图 3-2 图 3 为 HHC 的简化方框图。由 C1 和 C2 组成的电容分压器进行谐振电容器电压的采样。此处采样到的谐振电容器电压 VCR 连接到两个由栅极驱动信号控制的电流源。通过 VCR 节点上的拉电流或灌电流，采样到的谐振电容器电压会加上一个三角形补偿斜坡。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

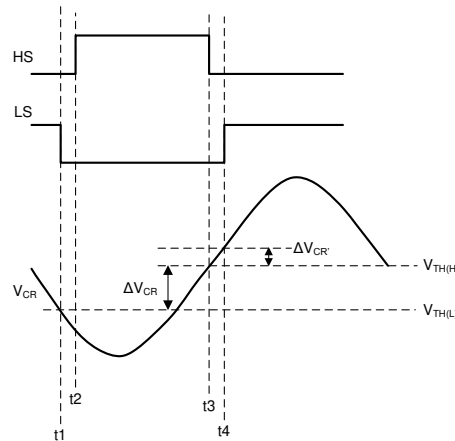
图 3-2. HHC 方框图

开关逻辑来自 V_{CR} 和环路补偿器输出 V_{COMP} 。 V_{CR} 引脚上的共模电压是 V_{CM} 。 V_{CM} 电压和 V_{COMP} 输出幅度用于生成两个逻辑阈值 V_{THH} 和 V_{THL} 。方程式 1 使用方程式 2 可计算出 V_{THH} ，而使用可计算出 V_{THL} 。

$$V_{THH} = V_{CM} + \frac{V_{COMP}}{2} \quad (1)$$

$$V_{THL} = V_{CM} - \frac{V_{COMP}}{2} \quad (2)$$

将 V_{CR} 引脚电压与这些逻辑阈值做比较。当 V_{CR} 电压大于 V_{THH} 阈值时，高侧开关将关闭。当 V_{CR} 电压小于 V_{THL} 阈值时，低侧开关将关闭。HO 和 LO 导通边沿由自适应死区时间电路控制。


图 3-3. HHC 栅极控制原则

与传统的频率控制相比，HHC 这种控制方法将功率级简化为一阶系统，不仅大幅简化了补偿，而且可以实现高带宽。此外，控制效果与充入谐振回路的输入电流直接相关，它具备固有的输入前馈功能，从而产生出色的输入线路瞬态响应。

4 瞬态响应比较

图 4-1 图 5 所示为使用 DFC 的 LLC 转换器的环路响应。此转换器的带宽为 1.75kHz，相位裕度为 60°。

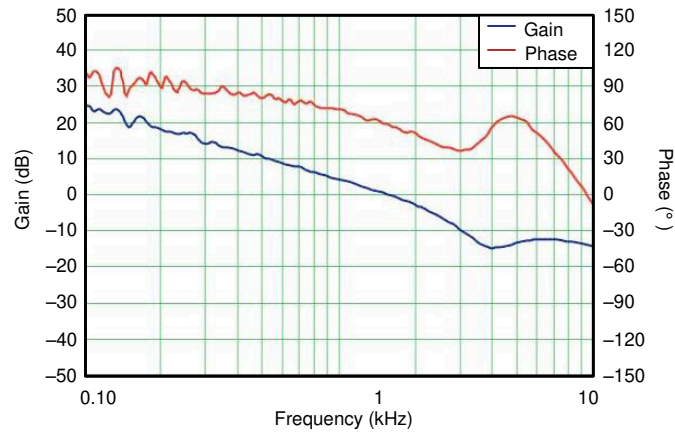


图 4-1. DFC 环路响应

此转换器具有良好的相位裕度，但带宽很低，这意味着 LLC 需要很长的时间才能对瞬态事件做出反应。图 4-2 图 6 所示为此转换器的瞬态响应，其中输出电流从空载跃升至满载。正如预期的那样，在瞬态事件期间会发生输出电压大幅下降的情况。在输出电压偏差超过 20% 的最坏情形下，转换器需要超过 2ms 的时间才能使输出电压回到稳定范围内。

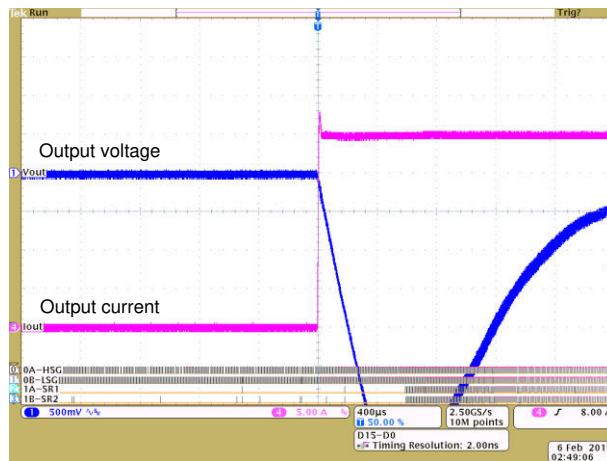


图 4-2. DFC 瞬态响应

图 4-3 图 7 所示为使用 HHC 的 LLC 转换器的环路响应，以作比较之用。实现的带宽为 6kHz，相位裕度为 50°。

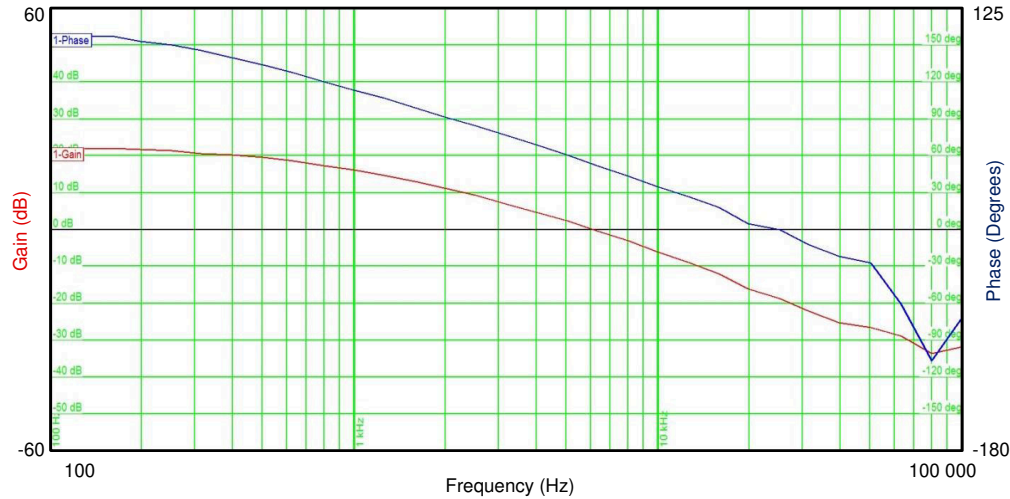


图 4-3. HHC 环路响应

图 4-4 图 8 中显示了瞬态响应，其中输出电流从空载跃升至满载。更大的带宽使转换器能够大幅提高响应速度，从而将输出电压的最大偏差限制在 1.25%。输出电压在 200 μ s 内恢复至调节值。

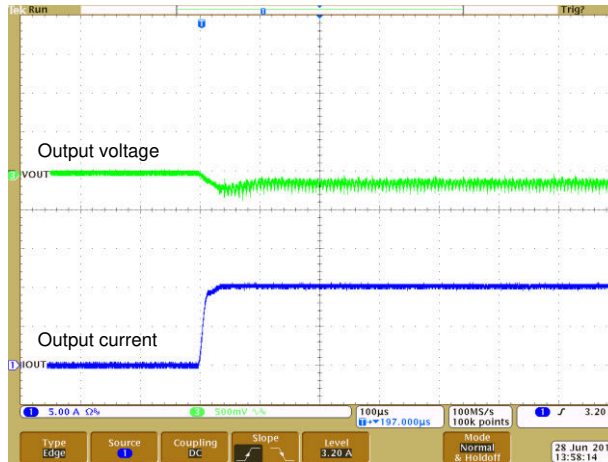


图 4-4. HHC 瞬态响应

混合迟滞控制 (HHC) 的瞬态性能得以改善有助于进一步优化 LLC 设计。当 LLC 使用 HHC 时，只需更少的输出电容即可满足给定的输出电压调节要求。因此，对于需要 LLC 拓扑的应用，HHC 有助于缩减材料清单 (BOM) 数量，并减小解决方案的尺寸。

5 参考文献

有关其他参考资料，请参阅：

- 德州仪器 (TI)，《LLC 谐振电源转换器的反馈环路设计》应用报告
- 德州仪器 (TI)，《具有超低可闻噪声和待机功率的 UCC25640x LLC 谐振控制器》数据表

6 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司