

使用基于 GaN 的 OBC 应对电动汽车 EMI 传导发射挑战

Brent McDonald
System Engineer
Power Supply Design Services

引言

车载充电器 (OBC) 是任何电动汽车的基本要素。为了减小车辆尺寸和减轻车辆重量, 氮化镓 (GaN) 等宽带隙器件是实现功率转换的热门选择。GaN 开关具有低输出电容 (C_{oss}), 能够比传统的硅金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 更快、更有效地进行开关, 从而显著减小 OBC 的体积。但是, 更快的开关速度确实引发了对电磁干扰 (EMI) 特征的相关影响的担忧。

本文回顾了国际无线电干扰委员会 (CISPR) 32 对 OBC 的 EMI 要求, 并讨论了关于可靠数据测量的最佳做法、GaN 对 EMI 频谱的影响以及有助于解决观察到的传导发射问题的想法。

系统概述

图 1 是 OBC 的示意图。功率因数校正 (PFC) 包括两个以 120kHz 固定频率和 180° 相位差运行的相位。电容-电感-电感-电容 (CLLLC) 以 250kHz 和 800kHz 之间的可变频率运行。在全功率运行 (6.6kW) 下, CLLLC 以大约 500kHz 的标称频率运行。该系统使用铝制冷板进行液冷, 如图 1 底部所示。该冷板对于围绕 EMI 进行讨论特别重要, 因为它连接到大地: 因此, 冷板的任何寄生电容都有可能产生共模发射。

图 1 展示了滤波器的结构, 以及与交流电源和 OBC 的相关连接。该滤波器是一个二级滤波器, 其差模电感来自共模扼流圈中的漏电感。

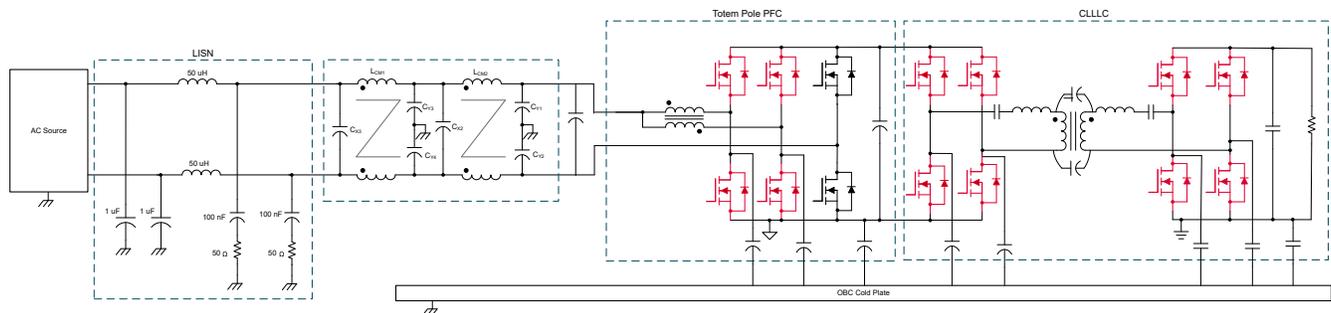


图 1. OBC 原理图。

图 2 展示了附有冷板的物理系统。



图 2. 带液冷冷板的 OBC 硬件。

EMI 滤波器设计

通常，EMI 包括差模和共模噪声。在 OBC 系统中，PFC 的输入电流是差模噪声的主要产生源，而共模噪声可能来自 PFC 和 CLLLC。图 1 展示了开关节点与冷板之间、冷板初级和次级接地之间以及 CLLLC 变压器初级和次级绕组之间的寄生电容。这些寄生电容会产生或影响系统中的共模噪声电流水平 [1]。

使用估算的寄生电容进行的仿真表明，在最坏的情况下，仅使用 $2.2\mu\text{F}$ 输入电容 C_{X1} 的裸差模噪声约为 $110\text{dB}\mu\text{V}$ 。同样，没有共模滤波器的裸共模噪声在大约 350kHz 时约为 $115\text{dB}\mu\text{V}$ 。如图 1 所示，二级滤波器的设计可衰减低于 CISPR 32 标准 [2] 的 EMI 噪声。在图 1 中， L_{CM1} 和 L_{CM2}

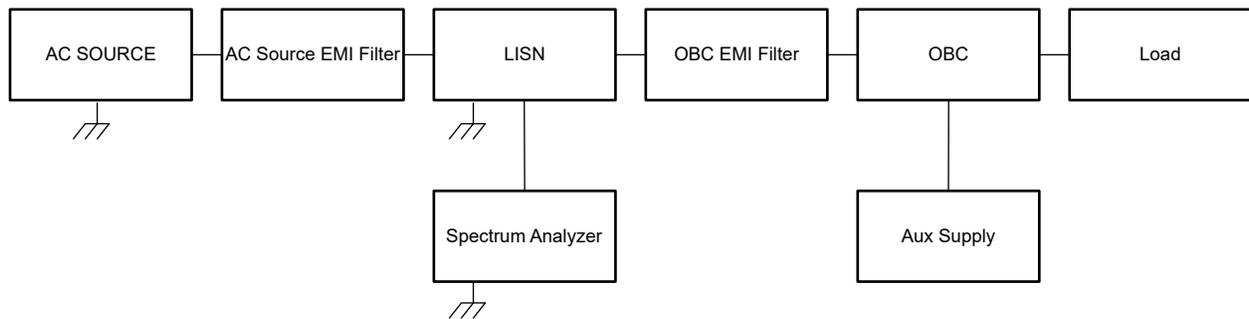


图 3. 测试设置的方框图。

结果

在测试阶段出现了几个难题。初始测试试图用一个电子负载、辅助电源和一台 PC 来表征 EMI，所有这些都连接到 OBC。这导致通过测试设备和 PC 的多个

在 350kHz 时的共模阻抗约为 $3\text{k}\Omega$ ，其漏感约为 $6.4\mu\text{H}$ ，用于差模噪声衰减。

在图 1 中， C_{X1} 和 C_{X2} 是用于衰减差模噪声的 $2.2\mu\text{F}$ 薄膜电容器，而 C_{Y1} 、 C_{Y2} 、 C_{Y3} 和 C_{Y4} 是用于衰减共模噪声的 4.7nF 陶瓷电容器。理想情况下，通过设计的滤波器，裸共模噪声和裸差模噪声均应衰减 $65\text{dB}\mu\text{V}$ 以上，EMI 噪声应符合 CISPR 32 标准。

然而，在高频和实际测试中仍然存在一些实际挑战。

测量设置

测量设置对于了解与 EMI 相关的挑战至关重要。图 3 展示了要考虑的基本要素。OBC 需要 12V 电源来为控制和偏置电路供电。这种偏置不会在待测器件中产生，因此需要某种辅助电源才能运行。

在选择电源之前，重要的是要认识到任何台式测试设备都有专属的内部 Y 电容器。这些电容器创建了一条路径，OBC 内的共模电流可以通过该路径流动。但由于这些电容器不是待测系统的一部分，因此它们的影响是在任何测量 EMI 中产生误差。使用与接地良好隔离的电源（在本例中为 12V 电池）有助于避免此问题。

OBC 的负载具有相同的潜在问题，需要使用电阻负载组。此外，虽然使用 PC 配置 OBC 进行操作，但在运行 EMI 扫描之前将其移除了；因此它没有显示在测量设置中。

接地返回路径产生问题。所有这些项目都有内部 Y 电容器，让共模噪声有机会流动。最终，在测试期间移除 PC、使用电池作为辅助电源并改为电阻负载，这三项操作消除了这些路径。

在解决了测量设置中的接地问题之后，仍然需要显著改进频谱。请注意，图 3 展示了与交流电源串联的滤波器。我只需要测量 OBC 生成的 EMI。交流电源产生的任何 EMI 都是与 OBC 无关的问题。在确定交流源将大量噪声注入测量频谱后，添加一个与交流源串联的滤波器可防止任何源产生的传导发射破坏 OBC 的测量 EMI 特征。

在系统开发早期，EMI 滤波器中有一个额外的 X 电容器，未在图 1 中显示。这个 X 电容器在图 4 中表示为 C_{X0} 。这

个电容器是由 C_{X0} 产生的 240kHz 谐振的一部分，即 OBC 寄生互连电感 (L_{P1} 和 L_{P2}) 和 C_{X1} 。如前所述，PFC 的每个相位都以 120kHz 和 180° 的相位差运行。这意味着 240kHz 是 PFC 产生的电流的基频。由于共振发生在该频率，频谱的 240kHz 分量的幅度显著增加。移除 C_{X0} 会消除这种共振。

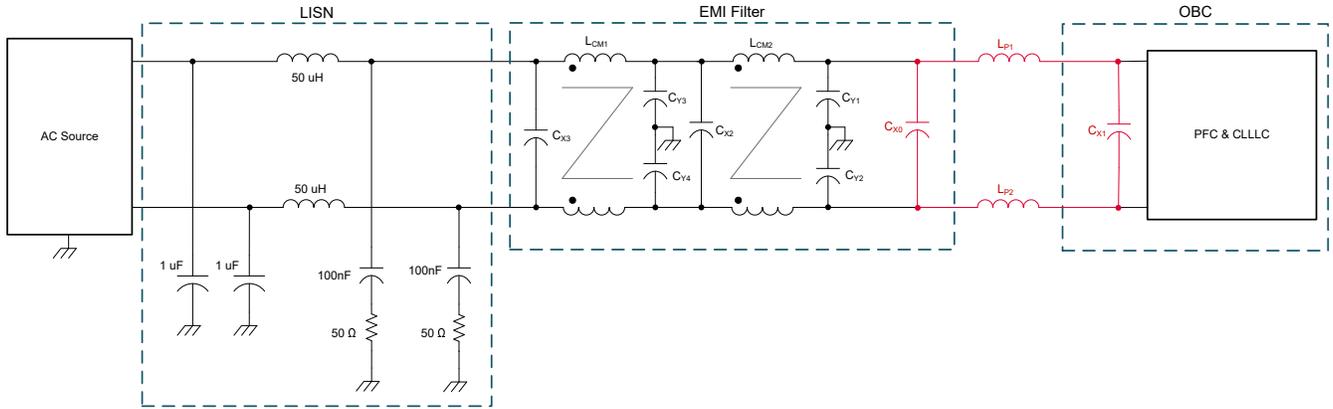


图 4. 突出显示寄生谐振的 EMI 滤波器。

下一个重要问题是绕过 EMI 滤波器的噪声，通过在 EMI 滤波器周围使用屏蔽以及用于互连的屏蔽电缆来解决这个问题。屏蔽 EMI 滤波器时，除 C_{X1} 外，整个 EMI 滤波器从主板上移除。EMI 滤波器放置在屏蔽外壳内。最终，将一组 4.7nF Y 电容器 (C_{Y5} 和 C_{Y6}) 放回主板上的位置，该位置非常靠近主板的底盘接地连接到冷板的位置。添加这些电容器可显著降低 5MHz 以上的 EMI 频谱。图 5 展示了带有额外 Y 电容器的最终滤波器。

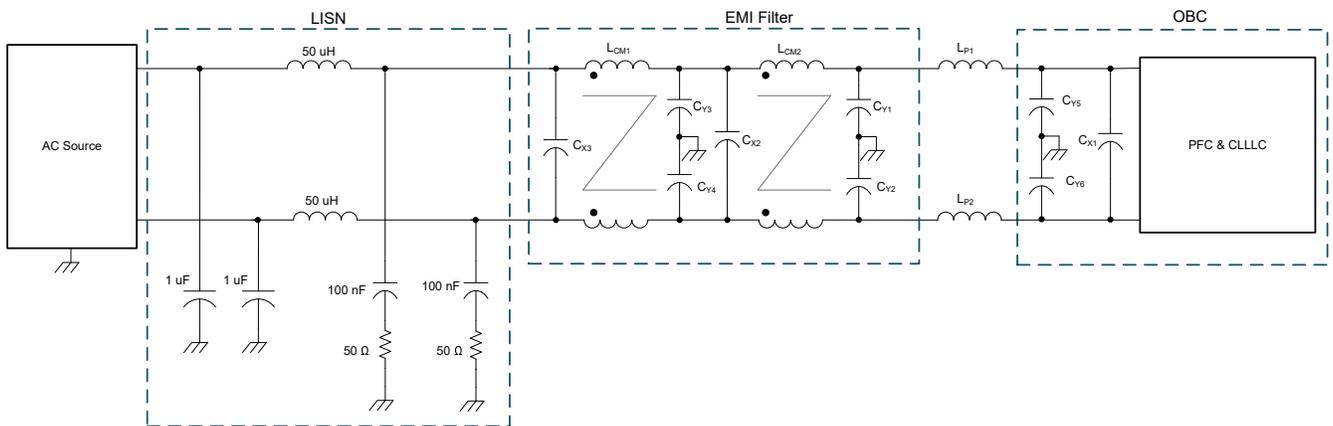


图 5. 删除了 C_{X0} 的最终 EMI 滤波器。

图 6 展示了最终 EMI 性能。此时，只剩下接近 10MHz 的小共振。为了解决这种谐振，您可以改善滤波器第二级中共模电感的高频特性，改进印刷电路板布局，或添加另一级带有铁氧体磁珠或小型共模扼流圈的高频电感来过滤高频噪声。

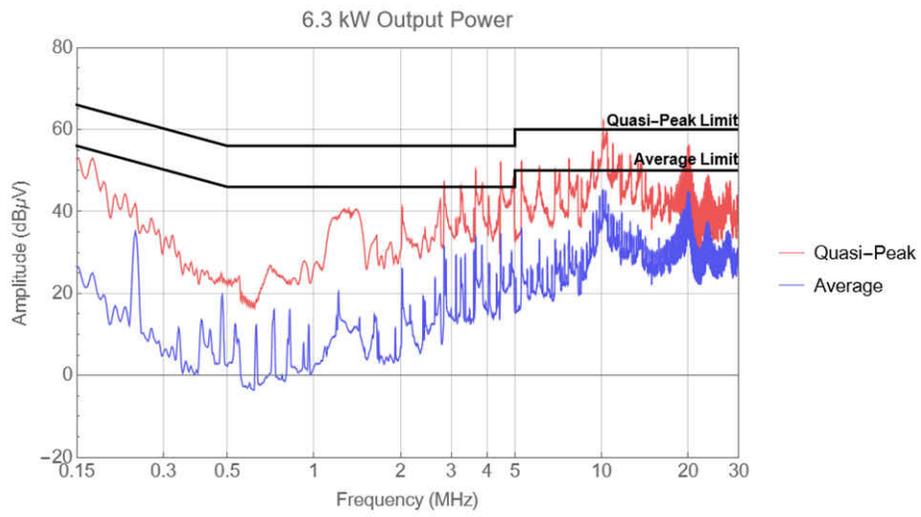


图6. 全功率EMI 滤波器扫描。

结论

EMI 在很大程度上取决于系统的电气特性和物理结构。这些因素导致难以列出一个能成功降低 EMI 的简单公式。

但是，在调试此示例中出现的问题后，可以突出显示几个要点：

- 接地是滤波器设计和测试中非常重要的方面。对于正确评估 EMI 和降低 EMI 水平，了解系统中的所有返回路径至关重要。
- 原理图上的内容并不是全部。理论上，您的过滤器可能具有您需要的所有衰减。但在现实中，滤波器将具有无法解释的寄生电容和互感耦合路径。这些路径导致管理 EMI 变得非常困难，尤其是在高频和低频时。请记住，小信号行为并不总是与大信号行为相同。滤波器在小电流幅度下的行为未必与同一滤波器在重负载时的行为相同。
- GaN 可以增加电源的功率密度，而不会对 EMI 频谱产生不利影响。虽然本文没有讨论 GaN 实现的功率密度改进，但您可以看到，通过使用传统的 EMI 缓解策略，可以处理更快的压摆率或开关频率带来的任何相关影响。实际上，数据中没有任何内容表明此设计的 EMI 问题比基于硅的设计更糟糕。这可能是非常重要的结果，因为减轻对这一因素的担忧会增强 GaN 的吸引力。

基于 GaN 的 6.6kW 双向车载充电器参考设计包括由 TI 的 GaN FET 实现的原理图、布局和测试结果。

参考文献

1. Yongbin Chu, Ashish Kumar, and Yogesh Ramadass. **Common-Mode EMI Cancellation in Full-Bridge Based Isolated DC-DC Converters**. Published in 2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), June 14-17, 2021, pp. 284-291. doi: 10.1109/APEC42165.2021.9487124.

2. “Electromagnetic Compatibility of Multimedia Equipment – Emission Requirements.” CISPR 32: 2015.CISPR: Geneva, Switzerland, October 2019.

相关网站

- 德州仪器 (TI): [适用于混合动力汽车/电动汽车车载充电器的双向 CLLLC 谐振双有源电桥 \(DAB\) 参考设计](#)
- 德州仪器 (TI): [使用集成式驱动器优化 GaN 性能](#)
- 德州仪器 (TI): [适用于 GaN 器件的直接驱动配置](#)
- [LMG352xR030-Q1](#)

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司