

# GaN ベースの OBC を搭載した電気自動車の EMI の課題に対する対策

**Brent McDonald**

System Engineer

Power Supply Design Services

## はじめに

オンボード チャージャ (OBC) は、あらゆる電気自動車に不可欠な要素です。自動車のサイズと重量を低減するために、電力変換を実装する際には、窒化ガリウム (GaN) などのワイドバンドギャップ デバイスが一般的な選択肢になっています。GaN スイッチは出力静電容量 ( $C_{OSS}$ ) が小さいので、従来型のシリコン MOSFET (金属酸化膜半導体電界効果トランジスタ) に比べて高速かつ効率的なスイッチングが可能で、OBC の体積を大幅に節減できます。ただし、スイッチング速度が高速なので、電磁干渉 (EMI) シグネチャに関連する影響に対して不安が生じます。

この記事は、OBC に関する CISPR (Comité International Spécial des Perturbations Radio é lectriques、国際無線障害特別委員会) の 32 EMI 要件を要約し、信頼性の高いデータを測定するベスト・プラクティス、GaN が EMI スペクトルに及ぼす影響、観察された伝導エミッションの問題を解決するのに役立つアイデアについて説明します。

## システムの概要

図 1 は OBC の回路図です。力率補正 (PFC) は、120kHz の固定周波数で 180° の位相差で動作する 2 つの相で構成されています。コンデンサ、インダクタ、インダクタ、インダクタ、コンデンサ (CLLLC) は、250kHz~800kHz の可変周波数で動作します。フルパワー動作 (6.6kW) では、CLLLC は約 500kHz の公称周波数で動作します。システムは、図 1 の底面に示されているアルミニウム製コールド プレートで水冷されています。このコールド プレートはグラウンドに接続されているため、EMI の議論で特に重要です。コールド プレートに対する寄生容量は、コモン モード エミッションを発生させる可能性があるからです。

図 1 に、フィルタの構造と、AC ソースおよび OBC への関連接続を示します。このフィルタは 2 段フィルタであり、コモン モード チョーク内の漏れインダクタンスから差動モードインダクタンスが生じます。

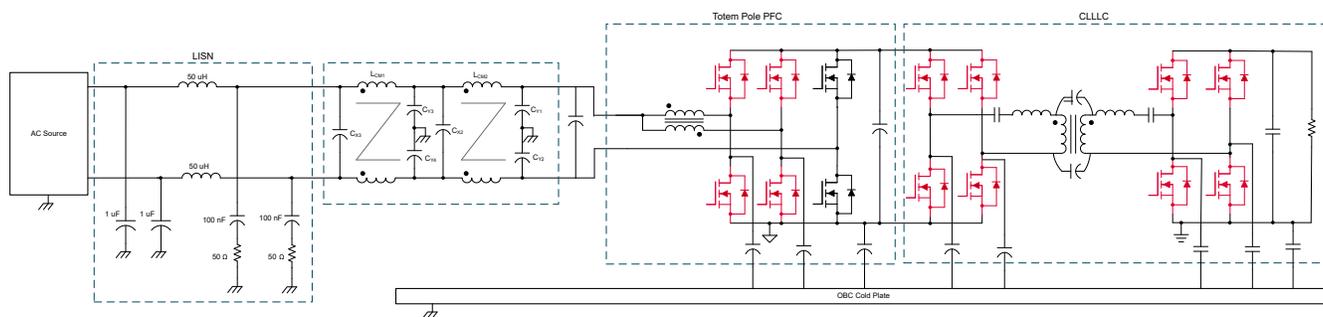


図 1. OBC の回路図

図 2 に、コールドプレートが取り付けられた物理システムを示します。



図 2. 水冷コールドプレート付き OBC ハードウェア

## EMI フィルタの設計

一般的に、EMI には差動ノイズとコモンモードノイズが含まれます。OBC システムでは、PFC の入力電流が差動モードノイズの主な発生源となり、コモンモードノイズは PFC と CLLLC の両方から発生する可能性があります。図 1 に、スイッチングノードとコールドプレートの間、コールドプレートの 1 次側グラウンドと 2 次側グラウンドの間、CLLLC トランスの 1 次巻線と 2 次巻線の間、寄生容量を示します。これらの寄生容量は、システム [11] のコモンモードノイズ電流レベルを生成する、またはコモンモードノイズ電流レベルに影響する可能性があります。

推定寄生容量を使用したシミュレーションで、ワーストケースでは、 $2.2\mu\text{F}$  入力コンデンサ  $C_{X1}$  のみを使用した場合の、修正前の差動モードノイズは約  $110\text{dB}\mu\text{V}$  であることが示されています。同様に、コモンモードフィルタを使用しない場合の、修正前のコモンモードノイズは、約  $350\text{kHz}$  において約  $115\text{dB}\mu\text{V}$  です。図 1 に示すように、2 段フィルタの設計により、CISPR 32 規格 [22] を下回りまで EMI ノイズが減衰します。 $350\text{kHz}$  での図 1 の  $L_{CM1}$  および  $L_{CM2}$  のコモンモード

インピーダンスは約  $3\text{k}\Omega$  であり、それらのリークインダクタンスは約  $6.4\mu\text{H}$  であり、差動モードノイズの減衰に使用されません。

図 1 では、 $C_{X1}$  と  $C_{X2}$  は差動モードノイズ減衰用の  $2.2\mu\text{F}$  フィルムコンデンサであり、 $C_{Y1}$ 、 $C_{Y2}$ 、 $C_{Y3}$ 、 $C_{Y4}$  はコモンモードノイズ減衰用の  $4.7\text{nF}$  セラミックコンデンサです。設計したフィルタを使用する場合、修正前のコモンモードノイズと修正前の差動モードノイズの両方を  $65\text{dB}\mu\text{V}$  以上減衰させるのが理想的であり、EMI ノイズは CISPR 32 規格を満たす必要があります。

ただし、高周波の場合や実際のテストでは、依然としていくつかの実際の課題があります。

## 測定の設定

EMI に関連する課題を理解するには、測定の設定が重要です。図 3 に、考慮すべき重要な要素を示します。OBC には、制御回路とバイアス回路に電力を供給するために  $12\text{V}$  電源が必要です。このバイアスは、テスト中のユニットでは生成されないため、動作には何らかの補助電源が必要です。

電源を選択する前に、ベンチに取り付けるテスト機器には独自の Y コンデンサが内蔵されていることを確認しておく必要があります。これらのコンデンサは、OBC 内部のコモンモード電流が流れる経路を形成します。ただし、これらのコンデンサはテスト対象システムの一部ではないため、これらのコンデンサの影響は測定対象の EMI に誤差を生じさせます。グラウンドから十分に絶縁された電源（この場合は  $12\text{V}$  バッテリー）を使用すると、この問題を回避できます。

OBC の負荷にも同様の潜在的な問題があるので、抵抗性負荷バンクを使用する必要があります。また、OBC を動作用に構成するために PC を使用していましたが、EMI スキャンを実行する前に PC を取り外していたため、測定の設定には表示されていません。

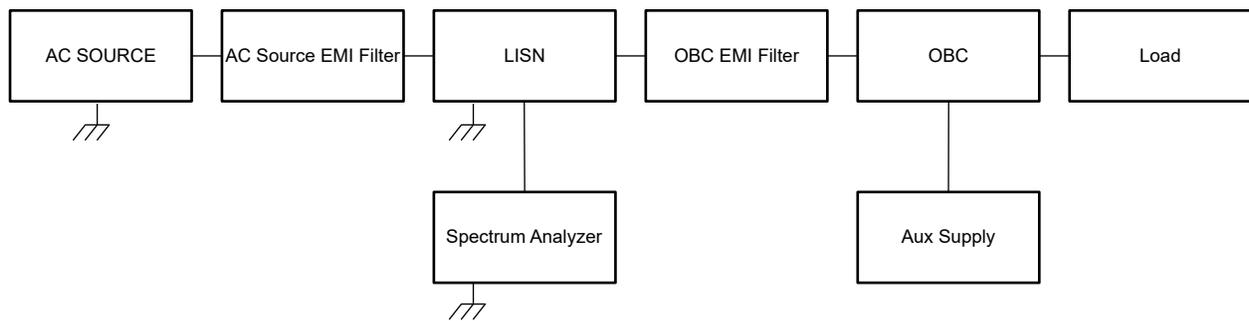


図3. テスト設定のブロック図

## 結果

テストフェーズでは、いくつかの課題が発生しました。最初のテストでは、電子負荷、補助電源、PCを使用してEMIの特性を評価しようとしました。これらはすべて、EMI スキャン中はOBCに接続されていました。これにより、試験装置とPCを経由する複数のGNDリターンパスで問題が発生しました。これらの装置にはすべてYコンデンサが内蔵されており、共通モードノイズが流れる可能性があります。テスト中にPCを取り外し、補助電源にバッテリーを使用し、抵抗性負荷に切り替えることで、最終的にこれらのパスが不要になりました。

測定設定で接地に関する問題を解決した後も、スペクトルを大幅に改善する必要がありました。図3では、フィルタがAC電源と直列に接続されていることに注意してください。測定したいのはOBCが生成するEMIだけです。AC電源が生成したEMIは問題であり、OBCとは何の関係もありません。AC

電源が測定したスペクトルに無視できないくらいのノイズを注入していることが確認されたので、AC電源と直列にフィルタを追加して、ソースで生成された伝導エミッションによってOBCの測定されたEMIシグネチャが破損されないようにしました。

システム開発の初期段階では、図1には示されていませんが、EMIフィルタにXコンデンサが追加されていました。このXコンデンサは、図4では $C_{X0}$ と表記されています。このコンデンサは、 $C_{X0}$ 、フィルタからOBCへの寄生相互接続インダクタンス ( $L_{P1}$  および  $L_{P2}$ )、 $C_{X1}$  によって生成される240kHz共振の一部です。すでに説明したように、PFCの各相は120kHzで動作し、互いに180°の位相差で動作します。これは、240kHzがPFCによって生成される電流の基本となることを意味します。この周波数で共振が発生したため、スペクトルの240kHz成分の振幅が大幅に増加しました。 $C_{X0}$ を削除すると、この共振が除去されます。

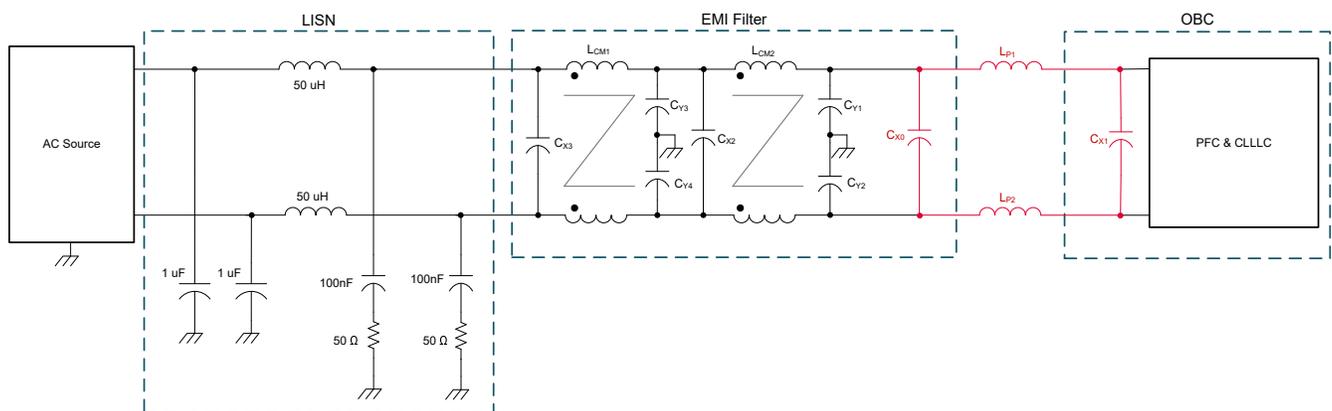


図4. 寄生共振を強調したEMIフィルタ

最も重要な問題は、EMI フィルタをバイパスするノイズでした。このノイズには EMI フィルタの周囲にシールドを配置し、相互接続にシールド ケーブルを使用することで対処しました。EMI フィルタをシールドするとき、 $C_{X1}$  以外の EMI フィルタ全体をメイン基板から取り外します。EMI フィルタは、シールド付き筐体の内部に配置しました。最終的に、一連の 4.7nF の Y コンデンサ ( $C_{Y5}$  と  $C_{Y6}$ ) をメイン ボードに戻し、メイン ボードのシャーシ グランドがコールド プレートに接続されている位置のごく近くに配置しました。これらのコンデンサを追加すると、5MHz を上回る EMI スペクトルが大幅に減少します。図 5 に、Y コンデンサを追加した最終的なフィルタを示します。

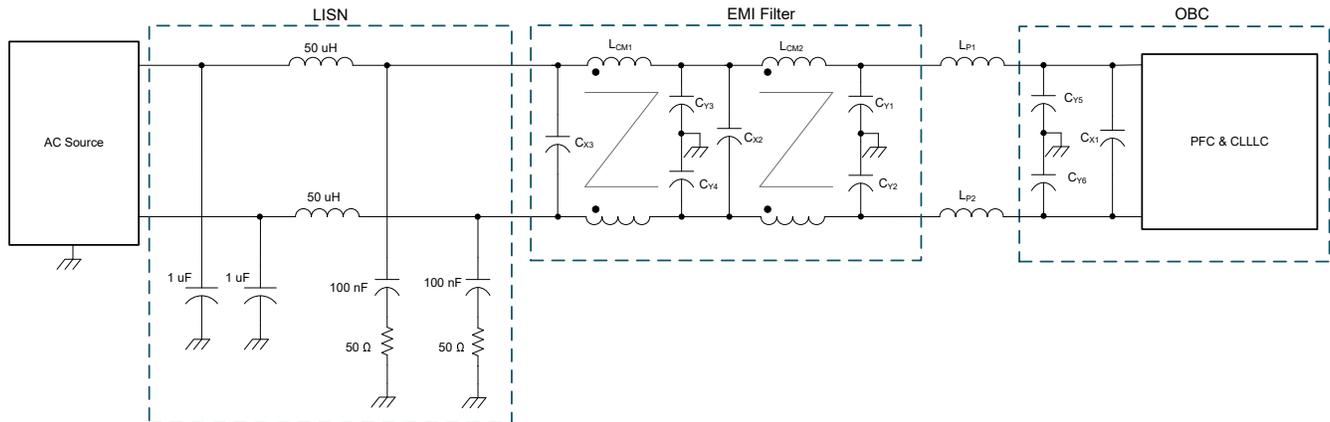


図 5.  $C_{X0}$  を削除した最終的な EMI フィルタ

図 6 に、最終的な EMI 性能を示します。この時点で残っているのは、10MHz 付近での小さな共振だけです。この共振に対処するために、フィルタの 2 段目で同相インダクタの高周波特性を改善するか、プリント基板のレイアウトを改善するか、高周波ノイズ フィルタリングのためにフェライト ビーズや小型コモンモード チョークを使用して別の段を追加することができます。

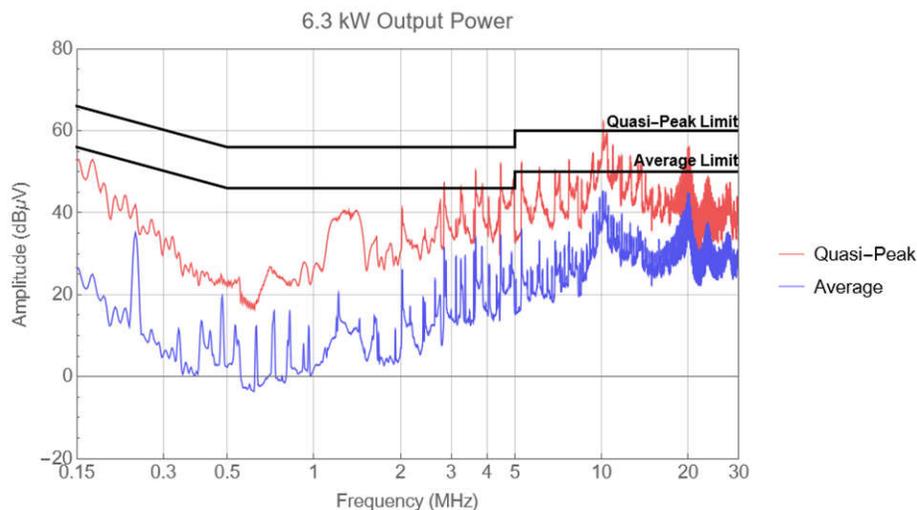


図 6. フルパワー EMI フィルタ スキャン

## まとめ

EMI は、電気的特性とシステムの物理的構造の両方に大きく依存します。これらの要因が原因で、EMI を正確に低減するためのシンプルな式を列挙するのは困難です。

ただし、今回の例の問題をデバッグした後、いくつかの重要な点を強調することはできます。

- フィルタの設計とテストでは、接地が最も重要です。EMI を適切に評価し、EMI レベルを低減するためには、システム内のすべてのリターンパスを把握することが不可欠です。
- 回路図に必要なことが全て表示されているわけではありません。理論上は、フィルタが必要とする減衰量のすべてを達成している可能性があります。ただし、実際には、フィルタには説明のつかない寄生容量と相互インダクタンスのカップリングパスが存在します。これらのパスを使用すると、EMI の管理が非常に困難になる可能性があります。特に、高周波の場合や低周波の場合に困難になります。小信号の動作は、大信号の動作と必ずしも同じではないことに注意してください。電流振幅が小さい場合のフィルタの動作は、同じフィルタの負荷が大きい場合の動作と必ずしも同じになるとは限りません。
- GaN を採用すると、EMI スペクトルに悪影響を及ぼさずに、電源の電力密度を高めることができます。この記事では、GaN が実現する電力密度の向上については説明しませんが、従来型の EMI 低減方式を使用すると、スルーレートやスイッチング周波数の高速化に伴う影響に対処について記載されています。事実、この設計の EMI 問題がシリコンベースの設計に比べてひどいことを示すデータは存在しません。これはおそらく最も重要な成果です。この要因に関する懸念を緩和すると、GaN の魅力が高まるからです。

## GaN ベースの 6.6kW 双方向オンボードチャージャのリファレンス デザイン

には、テキサス・インスツルメンツの GaN

FET によって得られる回路図、レイアウト、テスト結果が含まれています。

## 参考資料

1. Yongbin Chu, Ashish Kumar, Yogesh Ramadass [フルブリッジベースの絶縁型 DC/DC コンバータでの共通モード EMI キャンセレーション](#). 2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2021 年 6 月 14~17 日, pp. 284~291. doi で公開。10.1109/APEC42165.2021.9487124。
2. 「マルチメディア機器の電磁環境適合性-放射要件」 CISPR 32:2015.CISPR:スイス、ジュネーブ、2019 年 10 月。

## 関連ウェブサイト

- テキサス・インスツルメンツ: [HEV/EV のオンボードチャージャ向け、双方向 CLLC 共振デュアルアクティブブリッジ \(DAB\) のリファレンス デザイン](#)
- テキサス・インスツルメンツ: [統合型ドライバによる GaN 性能の最適化](#)
- テキサス・インスツルメンツ: [GaN デバイスの直接駆動構成](#)
- [LMG352xR030-Q1](#)

**重要なお知らせ:**ここに記載されているテキサス・インスツルメンツ社および子会社の製品およびサービスの購入には、TI の販売に関する標準の使用許諾契約への同意が必要です。お客様には、ご注文の前に、TI 製品とサービスに関する完全な最新情報のご入手をお勧め致します。TI は、アプリケーションに対する援助、お客様のアプリケーションまたは製品の設計、ソフトウェアのパフォーマンス、または特許の侵害に対して一切責任を負いません。ここに記載されている他の会社の製品またはサービスに関する情報は、TI による同意、保証、または承認を意図するものではありません。

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

## 重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ(データシートを含みます)、設計リソース(リファレンス・デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、または [ti.com](#) やかかる TI 製品の関連資料などのいずれかを通じて提供する適用可能な条項の下で提供されています。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案した場合でも、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

郵送先住所 : Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated