

## Technical Article

## EV オンボードチャージャ向けの CLLLC と DAB の比較



Brent McDonald

電気自動車 (EV) の電力を最適化するため、オンボードチャージャ (OBC) は高効率、軽量、小型である必要があります。EV が軽量であるほど、車両を動かすために必要な電力も少なく済み、全体的な効率が向上します。

OBC は、適切なグリッドから車両への電力供給 (G2V) 電圧および現在のバッテリー充電アルゴリズムをサポートする必要があります。そのため、OBC は電力グリッドと EV の間で電力コンディショニング インターフェイスとして機能します (図 1)。さらに、ピーク容量が変動する可能性のある再生可能エネルギー源を EV で補完できるように、自動車からグリッド (V2G) への電力供給能力も必要です。

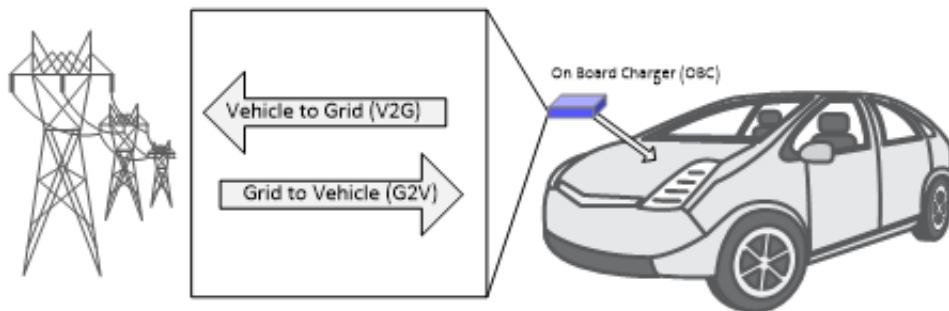


図 1. OBC には、適切な G2V 電圧をサポートし、V2G から電力を供給する能力が必要

電力グリッドと EV 内部の高電圧バッテリーの間のインターフェイスを容易にするため、電磁干渉 (EMI) フィルタ、力率補正 (PFC)、絶縁型 DC/DC 電力段が必要です。図 2 に、このアーキテクチャを示します。

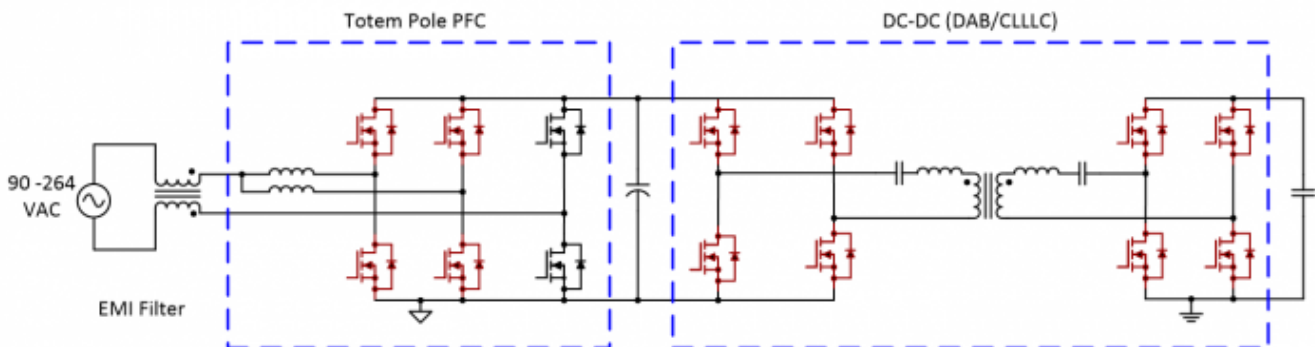


図 2. 電力グリッドとバッテリー間のインターフェイスとしての OBC の機能を示す概略回路図

この記事では、DC/DC 段についてのみ説明します。執筆時点での DC/DC 段の一般的な選択肢は、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) (図 3) とデュアル アクティブ ブリッジ (DAB) トポロジ (図 4) の 2 つです。どちらのオプションも、小型のソリューション サイズを実現でき、G2V と V2G に必要な電力要件を満たすことができます。

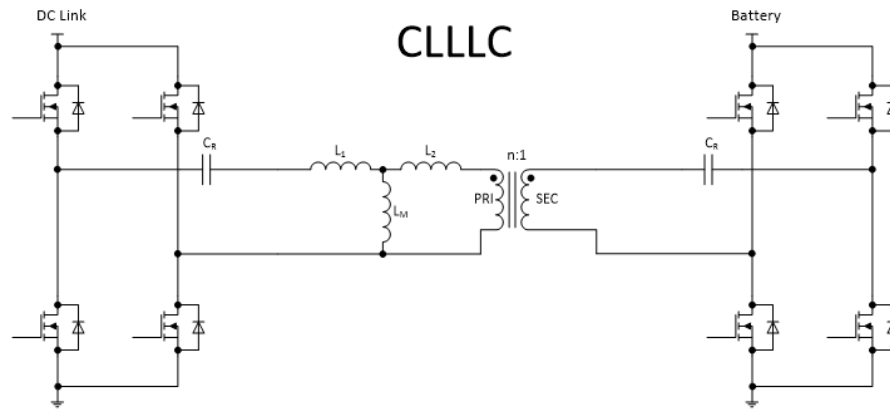


図 3. CLLC の基本的なトポロジを示す回路図

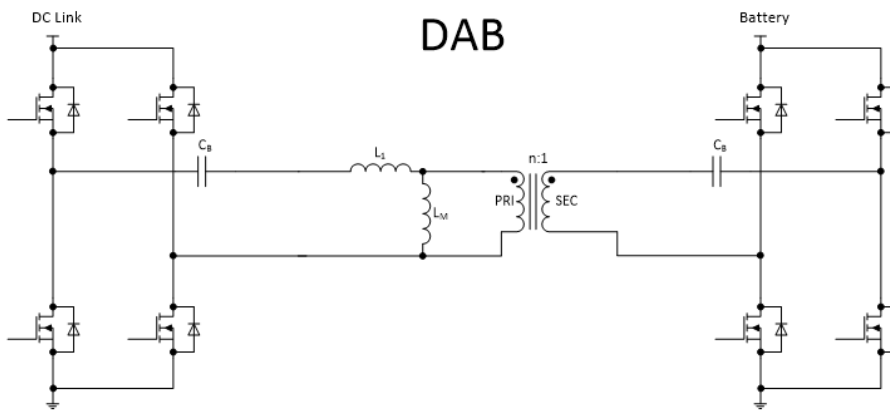


図 4. DAB トポロジを示す回路図

### OBC の性能を最高にし、サイズを最小化

これら 2 つのトポロジ オプションが OBC のサイズと性能にどのように影響するかを理解するため、バッテリー充電フェーズ (G2V) のみに焦点を当て、スイッチで許容可能な最大バッテリー電力を供給して充電時間を最短にする方法を検討してみます。たとえば、次の動作条件下のスイッチについて考えてみます。

- $P_{DISS} = 20W$
- $\theta_{JA} = 3^{\circ}C/W$
- $T_A = 65^{\circ}C$

式 1 を使用すると、スイッチの  $T_J$  は  $125^{\circ}C$  となります。

$$T_J = P_{DISS} \cdot \theta_{JA} + T_A \quad (1)$$

この設計のスイッチは、 $125^{\circ}C$  を超える温度を許容できないため、この条件がスイッチを破損することなく OBC でバッテリーに供給できる最高の電力レベルを表します。目標は、スイッチ内の消費電力を最小限に抑え、バッテリーをできるだけ高速に充電することです。

スイッチの電力損失の大部分は主に、2 乗平均平方根 (RMS) 電流と、スイッチがゼロ電圧スイッチング (ZVS) を維持する能力の 2 つの要因によるものです。

静電容量が小さく、ターンオン/ターンオフが高速なテキサス・インスツルメンツの GaN スwitch を使用すると、シリコンを使用する場合と比べ、コンバータが高いスイッチング周波数で動作できます。高周波動作は、リアクティブ素子のサイズに直接影響するため、トランス、インダクタ、コンデンサを小型化できます。まず DAB と CLLC のベースライン設計を確立し、その後コンバータの ZVS 範囲を拡張するための回路の改善方法を検討します。

## ベースライン DAB と CLLLC の性能比較

表 1 に、OBC の基本的な要件を示します。

表 1. OBC の電源要件

Description	Min	Typ	Max	Units
AC input voltage	90	220	264	V <sub>RMS</sub>
AC input current			32	A <sub>RMS</sub>
DC output voltage	250	400	450	V
DC output current (constant current mode)			20	A
DC output power (constant power mode): >210-V RMS input			6.6	kW

DAB と CLLLC 両方の詳細な設計を作成すると、実行可能性が最も高いタンク設計を判断するのに役立ちます。これを行う手順はここでは説明しませんが、スイッチ内での電力損失を適切に近似し、コンプライアンスと全体的な機能を検証するには、回路シミュレーションが最適です。さまざまな電力レベルと入出力電圧にわたってバッチ モードで実行するようシミュレータを設定し、DAB と CLLLC のインダクタ、コンデンサ、巻線比のさまざまな値をテストしました。各シミュレーション実行で、VIN、VOUT、スイッチ電力、RMS 電流、スイッチ ZVS 条件などのパラメータのデータを収集しました。表 2 に、最適化された 2 つのトポロジ設計を示します。

表 2. DAB と CLLLC の最適化された設計

Topology	DAB	CLLCC
Tank	$N_p/N_s = 1.1$ $L = 3.3 \mu\text{H}$ $L_M = 20 \mu\text{H}$	$N_p/N_s = 1.1$ $L_{R,1} = 2 \mu\text{H}$ $L_{R,2} = 2 \mu\text{H}$ $L_M = 14 \mu\text{H}$ $C_{R,1} = 50 \text{ nF}$ $C_{R,2} = 50 \text{ nF}$
Control	Triple phase-shift modulation	Frequency and phase-shift modulation
Variable DC link	400 V to 450 V	400 V to 450 V
$f_s$	500 kHz	300 kHz-800 kHz

図 5 に、主なシミュレーション結果を示します。各トポロジには 8 個のスイッチがありますが、これらのグラフでは電力損失が最大のスイッチのみをプロットしています。各スイッチに 3 つのグラフがあります。1 つ目は、スイッチ内の総損失を示します。2 つ目は、このスイッチを流れる RMS 電流を示します。右端の 3 つ目のグラフは、特定の GaN スイッチをオンにしたときに発生するワーストケースのドレイン - ソース間電圧を示します。これは、ZVS がどれだけ損失するかを表します。この電圧が高いほど、スイッチでの損失が大きくなります。したがって、スイッチの RMS 電流と、ZVS を維持する能力の組み合わせが、デバイス内の電力損失の最大部分を占めます。

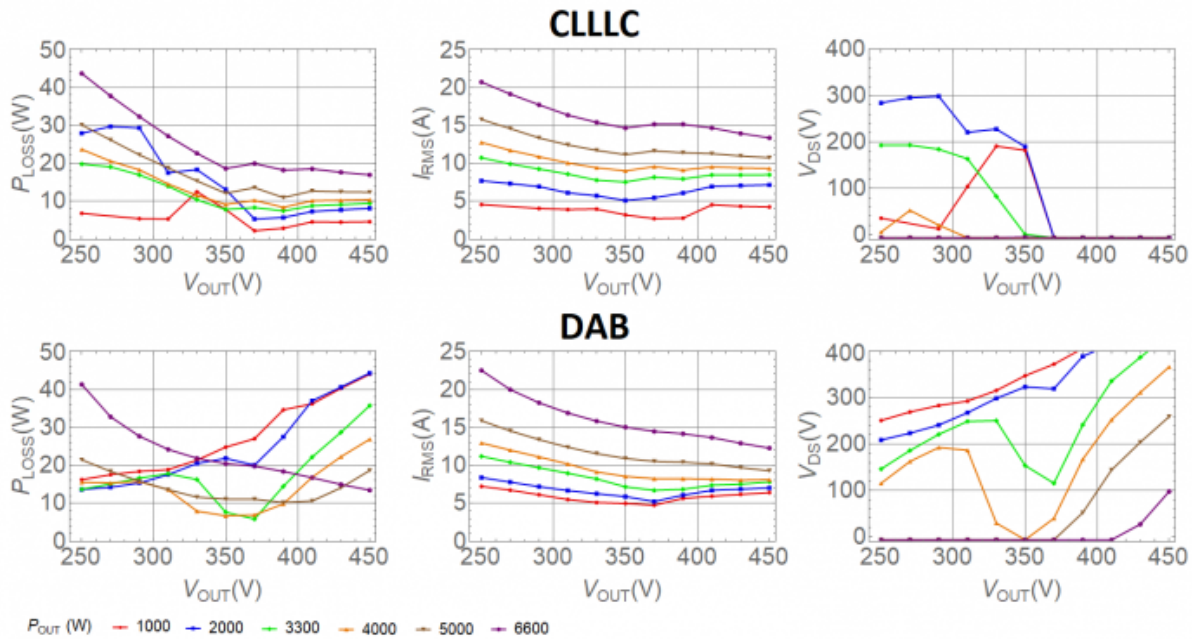


図 5. CLLLC と DAB の RMS および ZVS のベースライン条件を示すシミュレーション結果

これらの事実を踏まえてデータを慎重に検討すると、CLLLC のほうが ZVS を維持できる動作範囲が広いことは明らかです。したがって、CLLLC スwitch の電力損失が小さいのは、ZVS の維持能力が高いことによるものです。ただし、6.6kW での動作時には、DAB のほうが性能が優れています。これは、範囲のほとんどの部分で ZVS が良好で、RMS 電流が低いことによるものです。これらの結果に基づき、RMS 電流に悪影響を及ぼさずに ZVS を改善する方法を検討してみます。

### 整流インダクタの使用による ZVS の改善

図 6 および図 7 に、図 3 および図 4 と同じ CLLLC および DAB 回路にインダクタ (黄色で表示) を追加したトポロジを示します。このインダクタは、ZVS を維持する動作範囲を拡張するのに必要な追加電流を供給します。ここでは、これらの追加インダクタが常時動作している状況を考えてみます。

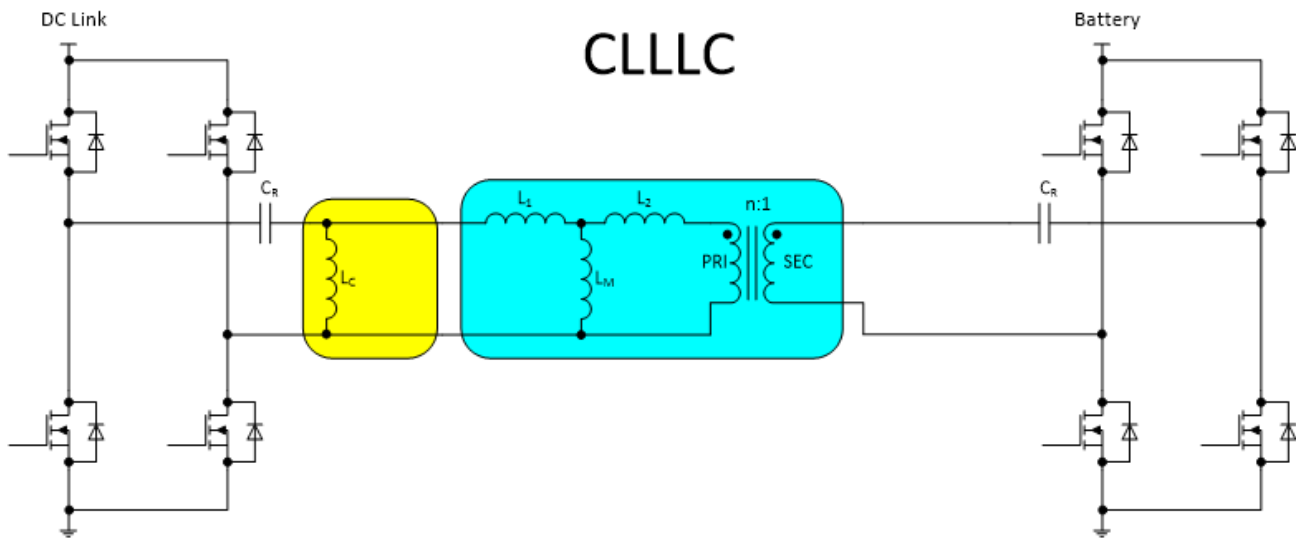


図 6. 整流インダクタを追加した CLLLC の回路図

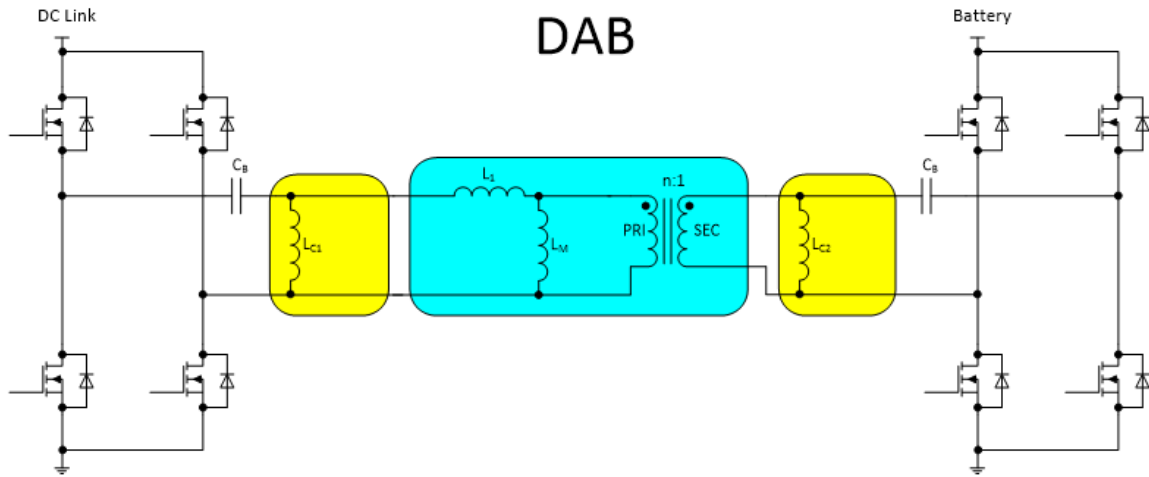


図 7. 整流インダクタを追加した DAB の回路図

表 3 に、新しいインダクタの値と、先ほどと同じ他のタンク パラメータを示します。

表 3. 整流インダクタ ( $L_C$ ) の値を追加した DAB と CLLLC の設計

Topology	DAB	CLLLC
Tank	$N_p/N_s = 1.1$ $L = 3.3 \mu\text{H}$ $L_M = 20 \mu\text{H}$ $L_C = 20 \mu\text{H}$	$N_p/N_s = 1.1$ $L_{R,1} = 2 \mu\text{H}$ $L_{R,2} = 2 \mu\text{H}$ $L_M = 14 \mu\text{H}$ $C_{R,1} = 50 \text{nF}$ $C_{R,2} = 50 \text{nF}$ $L_C = 50 \mu\text{H}$

図 8 に、図 5 のシミュレーションを繰り返した結果を示します。

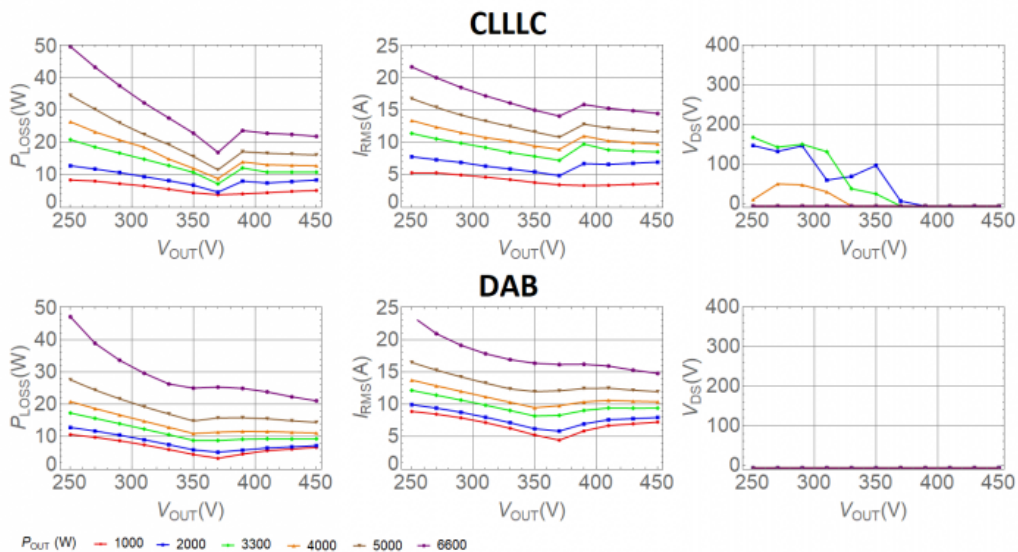


図 8.  $L_C$  を使用した場合の各回路での RMS と ZVS

この場合、DAB は動作条件の全範囲にわたって完全な ZVS を実現できることがわかります。これは、GaN スイッチの  $V_{DS}$  がターンオン時に常に 0V であることから明らかです。CLLLC は完全な ZVS を実現していませんが、ZVS が大幅



に改善されています。ただし、どちらのトポロジでも ZVS は改善していますが、RMS 電流が大幅に増加しています。電力損失だけに注目すると、範囲のほとんどの部分で DAB コンバータのほうが優れているのがわかります。

図 8 の図 5 との比較に戻ると、整流インダクタを追加することで、条件によっては損失が悪化していることがわかります。ここで、図 5 と図 8 の最小損失を達成できるハイブリッド アプローチがないかを考えてみます。

### 総損失の最小化

整流インダクタを追加することで、コンバータが ZVS を維持する動作条件を広げることができます。これは、コンバータだけでは ZVS を維持できない条件において大きな利点となります。整流インダクタの問題点は、損失が改善するのは、整流インダクタがなければ ZVS を維持できない条件のみだということです。コンバータがすでに ZVS を維持できている条件では、整流インダクタは電流を増加させるため、スイッチでのオーム損失が大きくなります。

この考察に基づき、重負荷では整流インダクタをオフにし、軽負荷ではオンにするハイブリッド アプローチをテストしてみます。図 9 に、このアプローチでのシミュレーション結果を示します。このアプローチでは、重負荷時には、各トポロジで RMS 電流を低く保ち、すでにある ZVS を維持する能力を活かすことができます。

ここでは、スイッチに不要な RMS 電流が流れるのを防ぎ、ソリューションのサイズが不要に大きくならないようにするため、スイッチの熱エンベロップ内に収まる最小限の整流インダクタンスと動作時間のみを追加するように注意しました。結果を見ると、DAB コンバータは、全動作範囲にわたって完全に ZVS を維持できていません。ZVS 条件は大幅に改善されていますが、前述の 20W スイッチ ターゲット内に維持するのに必要な条件を満たすだけにとどまっています。

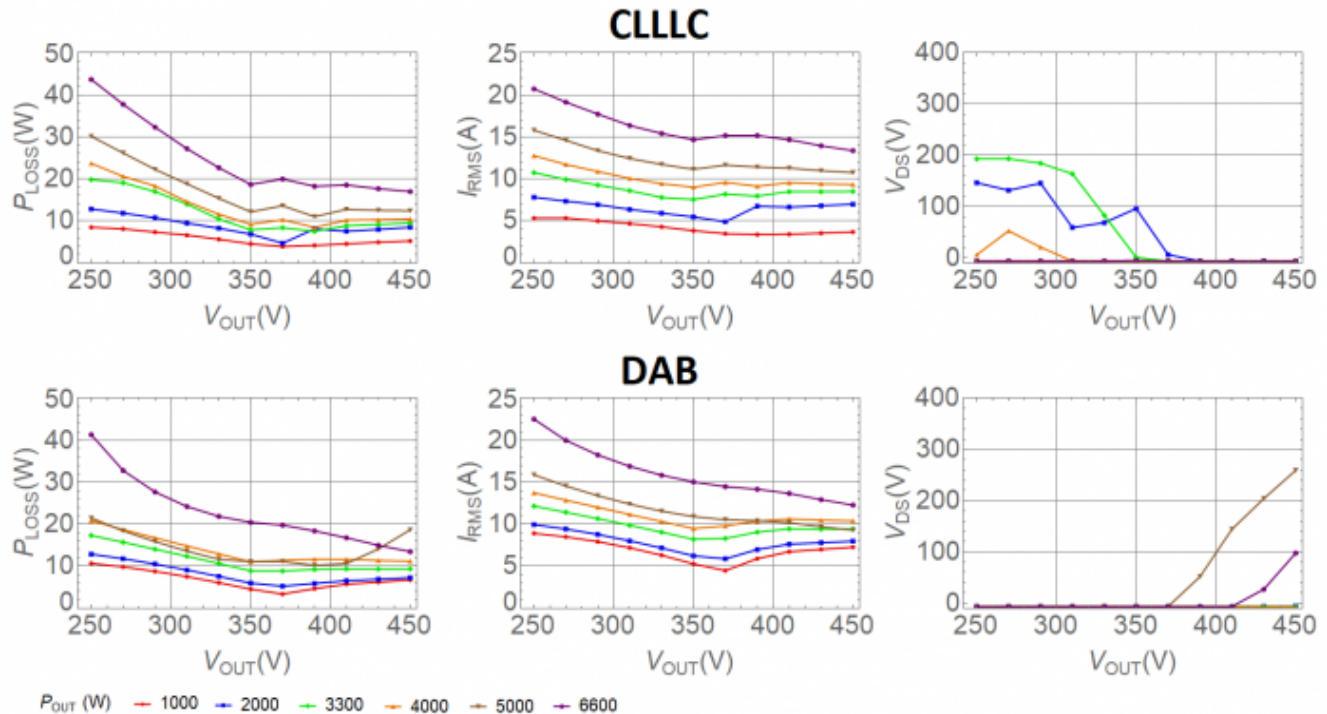


図 9. ハイブリッド アプローチでの RMS と ZVS の結果

トレードオフをより明確にするため、図 10 に各方法の電力損失をまとめて示します。DAB コンバータのほうが、スイッチ内の電力損失に関して優れていることがわかります。

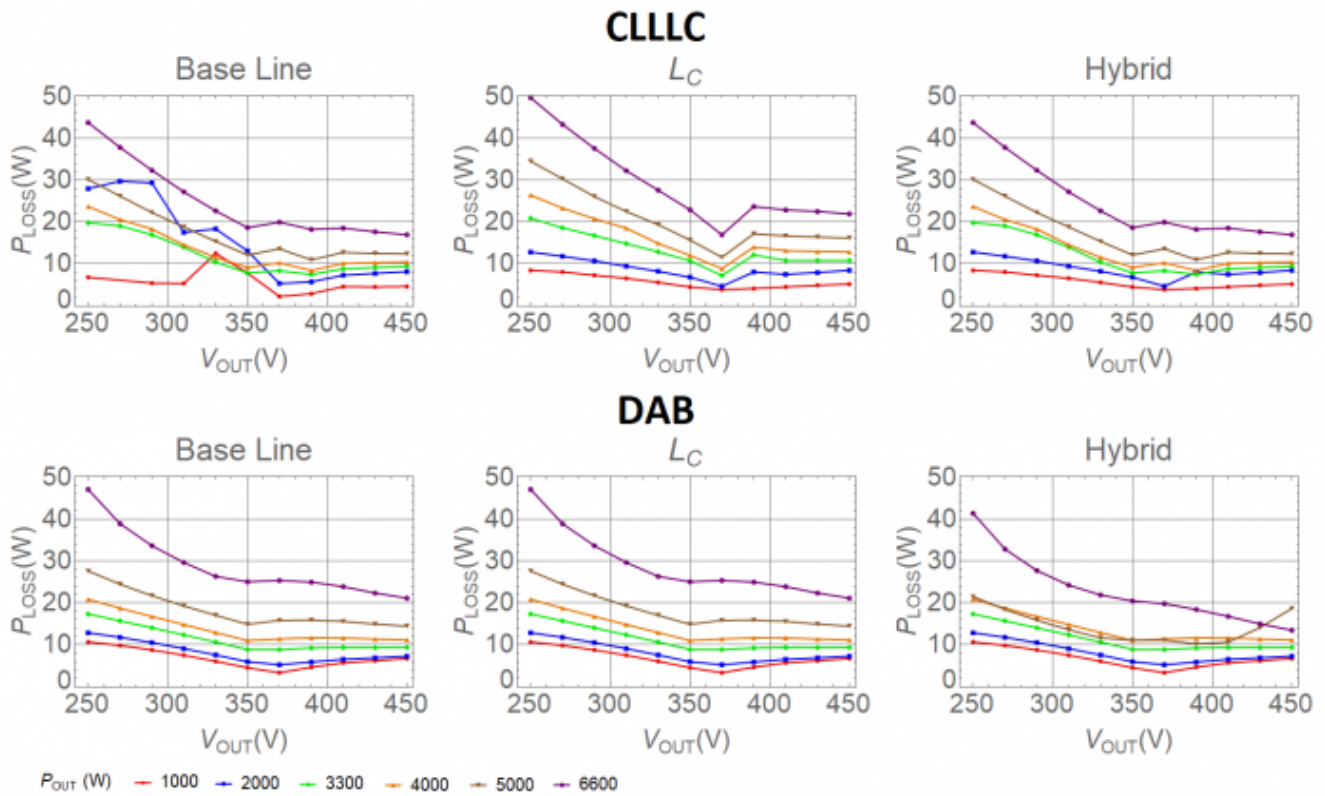


図 10. トレードオフを明確に示すため各方法の電力損失を表示

これら 2 つのコンバータの性能の違いを理解しやすくするため、図 10 のデータを再フォーマットしてプロットしたものを図 11 に示します。このグラフは、それぞれのコンバータが供給できる最大電力を示しています。ここでは、スイッチが 20W を超える電力を安全に消費できないと想定しています。20W は、接合部温度を 125°C 未満に保ちながらスイッチで許容できる最大損失を表します。

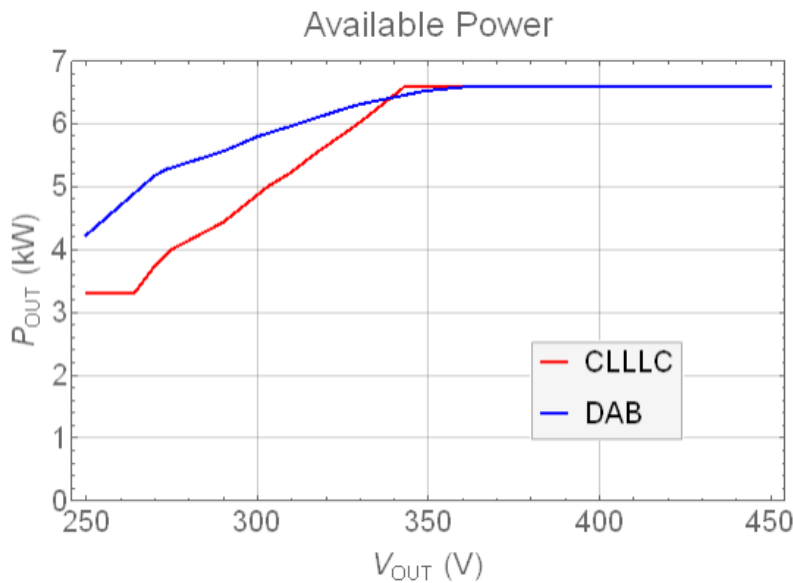


図 11. 各コンバータで供給可能な最大電力

## CLLLC と DAB の比較

図 11 で青い線が赤い線の上にあることから、DAB コンバータが CLLLC よりも広範囲にわたってより多くの電力を供給できることがわかります。これにより、DAB のほうが明らかに優れていると判断しがちですが、サイズと重量の最小化が OBC の主要な要件であることに注意してください。DAB コンバータには 2 個の追加インダクタを必要としますが、CLLLC に必要なのは 1 個のインダクタのみです。この点で、CLLLC のほうが有利であると考えられます。

エンジニアリングにおいては、ほとんどの場合、最良の方法は要件に対するトレードオフで決まります。何かを犠牲にせずに大きな利点が得られることはまれで、それはこの場合にも当てはまります。CLLLC は、サイズに関して明らかな利点があるため、DAB よりもわずかに勝っていると考えられます。

### 参考資料

1. E.F. de Oliveira, P. Zacharias, 『電気自動車アプリケーション用の双方向 CLLC 共振コンバータの包括的モード解析と最適設計方法論』、第 21 回パワー エレクトロニクスとその応用に関するヨーロッパ国際会議 (EPE '19 ECCE ヨーロッパ)、2019 年 9 月 3～5 日、pp. 1～10。
2. F. Krismer, J.W.Kolar, 『効率が最適化された車載アプリケーション用の大電流デュアル アクティブ ブリッジ コンバータ』、IEEE Transactions on Industrial Electronics 59, no. 7 (2012 年 7 月): pp. 2745～2760。
3. テキサス・インスツルメンツ (発行年記載なし)、『GaN (窒化ガリウム): シリコンを超える性能を実現』、2020 年 10 月 19 日アクセス。

### 関連記事

- 『電気自動車の充電: テクノロジーとスマート エンジニアリングを活用した電気自動車の将来の実現』
- 『電気自動車のワイヤレス充電向けの電力伝送』
- 『効率的でコスト効率の優れた 800V EV トラクション インバータを実現する GaN』
- 『ポータブル充電ソリューションによる EV 向けのロードサイド アシスタンス』
- 『Power Tips #75: 車載システム向け USB パワー デリバリ』
- 『Power Tips #92: 高周波共振コンバータ設計時の考慮事項』

以前 [EDN.com](https://www.edn.com) で公開された記事です。



## 重要なお知らせと免責事項

テキサス・インスツルメンツは、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、テキサス・インスツルメンツ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 テキサス・インスツルメンツ製品の選定、(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ます。

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 テキサス・インスツルメンツ製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツおよびその代理人を完全に補償するものとし、テキサス・インスツルメンツは一切の責任を拒否します。

テキサス・インスツルメンツの製品は、[テキサス・インスツルメンツの販売条件](#)、または [ti.com](https://www.ti.com) やかかる テキサス・インスツルメンツ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。テキサス・インスツルメンツがこれらのリソースを提供することは、適用されるテキサス・インスツルメンツ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、テキサス・インスツルメンツ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

## 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