

パッケージ封止のeGaN® FETを使って2 kWで48 V/12 V の間の双方向パワー・モジュールを設計する方法



はじめに

2025年までに、世界中で販売される10台に1台の自動車が48 Vのマイルドハイブリッド車になると予測されています。48 Vシステムは、燃料効率を高め、エンジンのサイズを大きくすることなく4倍の電力を供給し、システム・コストを増やすことなく二酸化炭素排出量を削減できます。これらのシステムには、1.5 kW~6 kWの電力範囲を備えた48 V/12 Vの間の双方向コンバータが必要です。これらのシステムの設計上の優先事項は、サイズ、コスト、高い信頼性です。

このアプリケーション・ノートでは、QFNパッケージに封止したGaN FETを使って、96%の効率が得られる2 kWで、48 V/12 Vの間の2相双方向コンバータEPC9165の設計について説明します。ユニットがシャーシに取り付けられた状態で、最終的に車内で機能するため、放熱能力は、無限と見なすことができます。

双方向DC-DCコンバータの設計

双方向DC-DCコンバータEPC9165の簡略化した回路図が図1です。同期バック（降圧型）／ブースト（昇圧型）・コンバータは、最も単純な双方向コンバータなので、基本回路構成として選択しました。その他のサポート回路には、電流センサー、温度センサー、デジタル・コントローラ、ハウスキューピング電源が含まれています。

48 Vのアプリケーションで使われるGaN FETは通常、同様のMOSFETと比べて、性能指数FOM (figure of merit、チップ面積・オン抵抗 $R_{DS(on)}$) が4倍優れています [1]。ゲート電圧5 Vで同じ場合、GaN FETのゲート電荷は、MOSFETの1/5程度です。GaN FETのその他の重要な利点には、出力容量 C_{OSS} が小さく、電圧遷移が速く、逆回復がゼロであり、物理的に小型なことなどがあります。

この設計では、eGaN FETのEPC2302[2]を使っています。低インダクタンスの面積 3×5 mmのQFNパッケージで、上部が露出しているため、優れた熱管理が可能です。 $R_{DS(on)}$ が1.8 m Ω の場合、定格ピーク直流電流は101 Aです。したがって、2相アプローチを選択して、FETの電流要件を軽減します。つまり、14 V、2 kWの出力で、各相の直流電流を70 Aに減らします。これによって、コイルの定格電流の要件も低減できます。

この設計のゲート・ドライバMPQ1918-AEC1[3]は、車載品質AEC-Q100認定済みであり、ハイサイドFETを駆動するために電圧クランプを備えたブートストラップ技術を使っています。伝搬遅延時間が短く、伝搬遅延時間のマッチングが標準値で1.5 ns以下と優れています。

米ビシェイ・インターテクノロジーのIHTH-1125KZ-5Aシリーズのコイル[4]は、インダクタンスに対して電流定格が高くなっています。この設計では、1.0 μ Hのコイルと500 kHzのスイッチング周波数が選択されているため、ピーク・コイル電流が80 Aになります。

正確な相電流バランスを確保するには、コイルのDCR（直流抵抗）の電流検出よりも精密シャント抵抗を使った電流検出を推奨します。ただし、定格が70 Aを超えるシャント抵抗は通常、実装面積が大きいので、寄生インダクタンスが高くなります。このインダクタンスによって、電流検出アンプが飽和し、測定が無効になる大きな雑音が発生する可能性があります。簡単な解決策は、時定数が一致するRCフィルタ・ネットワークを追加することです。この設計では、最大帯域幅500 kHz、利得50 V/Vの電流検出アンプMCP6C02を使っています。この結果、0.2 m Ω のシャント抵抗で全電流検出10 mV/Aが得られます。

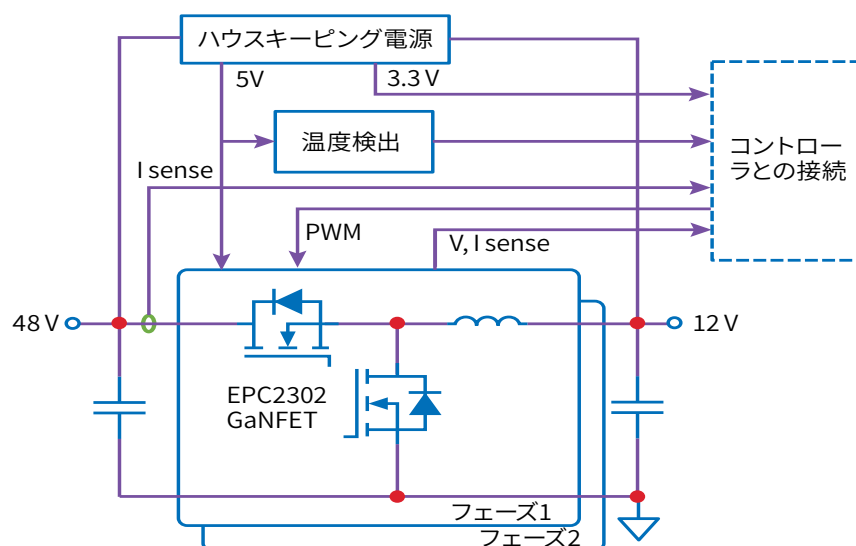
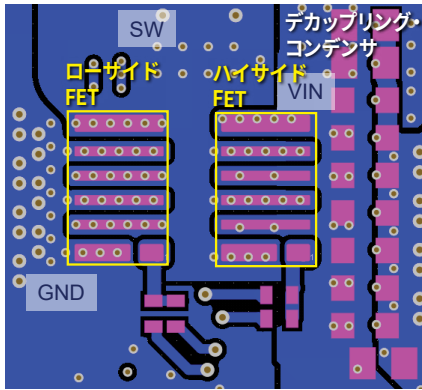
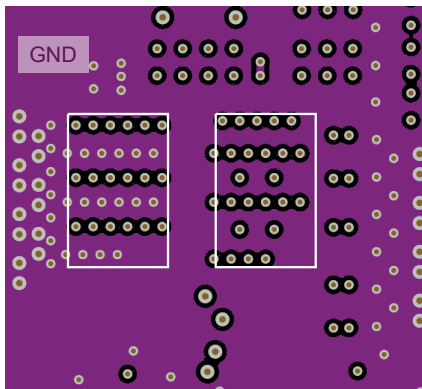


図1. EPC9165システムの回路ブロック図。

2相間の対称レイアウトは、相電流のバランスを取り、ゲート駆動遅延、スイッチング遷移速度、オーバーシュートなどの不一致による影響を最小限に抑えるためにも重要です。図2に、この設計のGaN FET周辺のレイアウト例を示します。デカップリング・コンデンサをFETの近くに配置し、その下にしっかりとした接地面を備えることによる内部垂直レイアウト技術 [1] を使っています。



(a)



(b)

図2. GaN FET周辺のプリント回路基板の上部2層のレイアウト例：
(a) グラウンド (GND)、スイッチング・ノード (SW)、入力 (V_{IN}) の回路網で構成される最上層、および (b) 中間層1のしっかりとした接地面。

デジタル制御

この設計では、米マイクロチップ・テクノロジーのデジタル・コントローラdsPIC33CK256MP503[5]を使っています。これは、最大CPU速度が100 MIPSの16ビット・プロセッサです。パルス幅変調 (PWM) モジュールは、高解像度モードで構成できるため、デューティ比とデッドタイムで250 psの解像度が得られ、デッドタイムを正確に調整してGaN FETの高性能を十分に活用できます。

デジタル平均電流モード制御は、バック・モードとブースト・モードの両方に実装されています。この電流検出回路は、検出抵抗と差動アンプで構成されています。この設計では、低損失の0.2 mΩの検出抵抗と低雑音アンプMCP6C02を使っています。この制御回路ブロック図が図3です。2つの独立した電流ループに同じ基準電流 I_{REF} を使っています。この結果、両方のコイルの電流が同じ値に調整されます。2つの内部電流ループの帯域幅は6 kHzに設定し、外部電圧ループの帯域幅は800 Hzに設定しています。

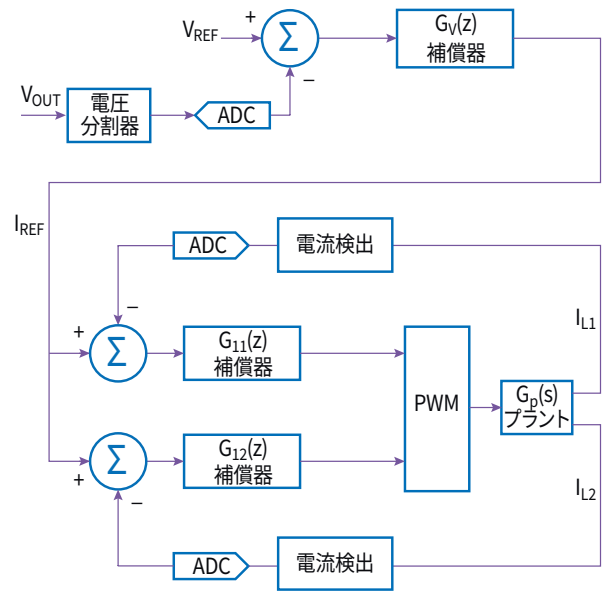


図3. デジタル平均電流モード制御回路図

熱管理

2 kWの最大出力電力では、GaN FETにヒートシンクが必要です。市販の標準の $\frac{1}{8}$ ブリック・ヒートシンクを使っています。ヒートシンクの実装に適切な間隔を提供するために、4つの金属スペーサがプリント回路基板に取り付けられています。FETとヒートシンクの間には熱伝導材料 (TIM: thermal interface material) が必要です。通常、この材料は、a) 圧縮による機械的コンプライアンス、b) 電氣的絶縁、c) 良好な熱伝導性を備えていなければなりません。この設計では、17.8 W/mKのTIMを使っています。図4に、ヒートシンク実装の3次元図を示します。

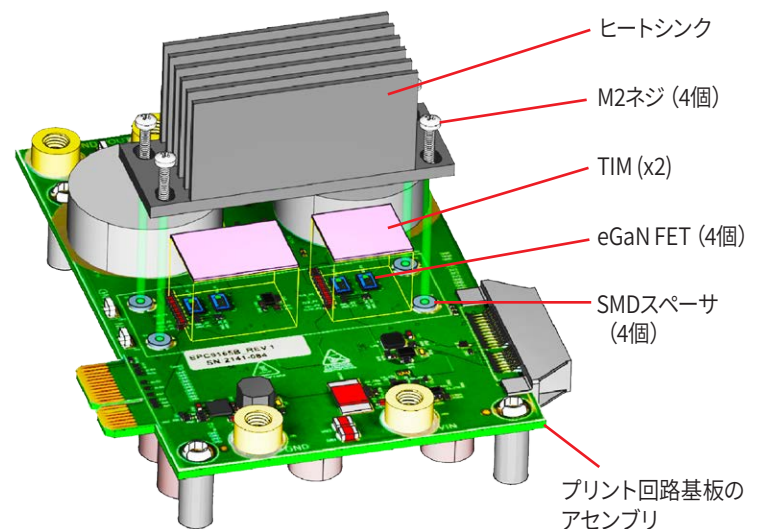


図4. ヒートシンク実装の図。SMDスペーサ、熱伝導材料を示しています。

特性測定の結果

図5は、ヒートシンクが取り付けられていないコンバータEPC9165[6]の写真です。寸法は、エッジ・コネクタを除いて4.3×2.8×1.6インチ(108×70×40 mm)です。

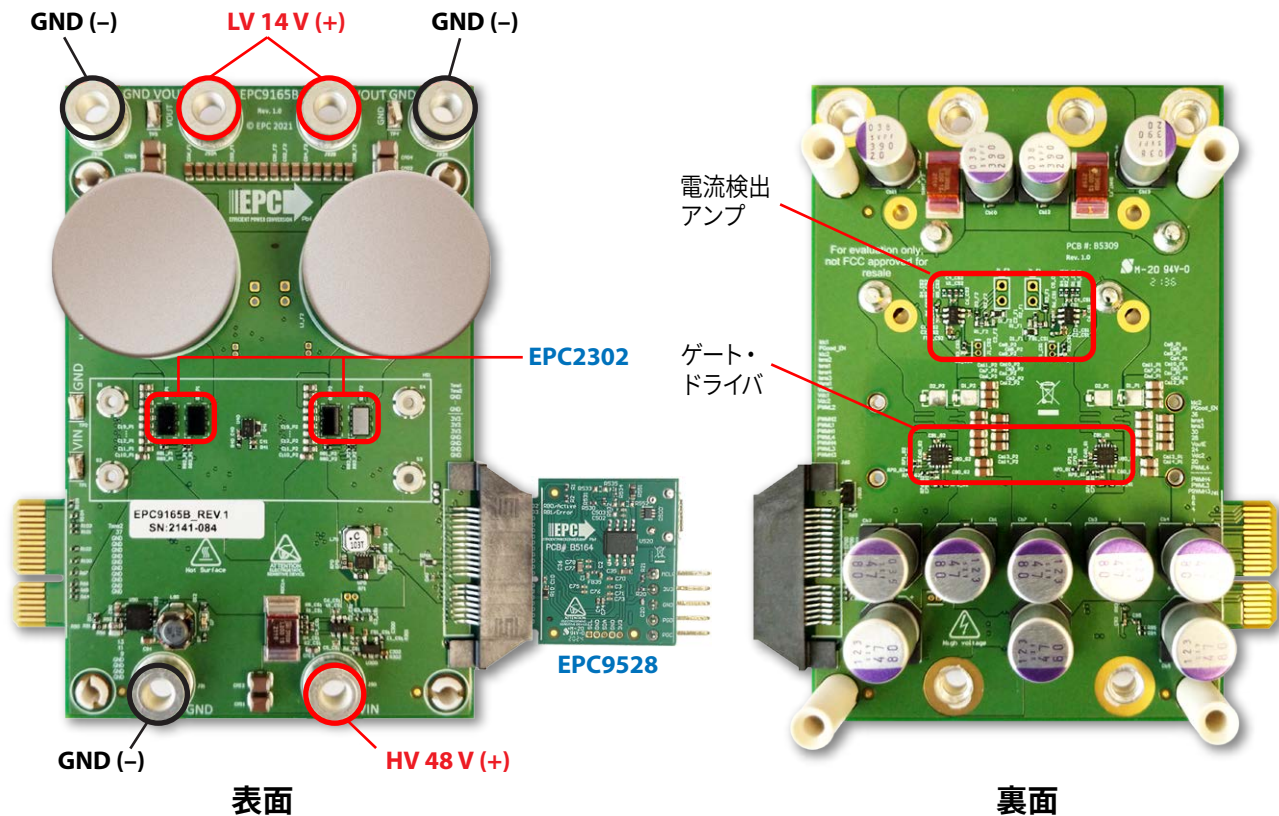


図5. コントローラdsPIC33CK搭載モジュールEPC9528を備えたコンバータEPC9165の写真

ヒートシンクを取り付け、1700 LFMのエアフローを使ったコンバータを48 V入力、14.3 V出力で動作させ、500 kHzでテストした効率の測定結果を図6に示します。500 kHzで1 μ Hのコイルを使ったとき、このコンバータはピーク効率97%が得られました。図7に示すように、このコンバータは、ブースト・モード動作用に14.3 V入力、48 V出力でもテストしました。

全負荷時、最大スイッチング周波数100 kHzでのコイル電流の制限によって600 W/相に制限されるシリコン・ベースのソリューションと比べて、EPCのeGaN FETは500 kHzのスイッチング周波数において効率96%で動作でき、1 kW/相が可能です。

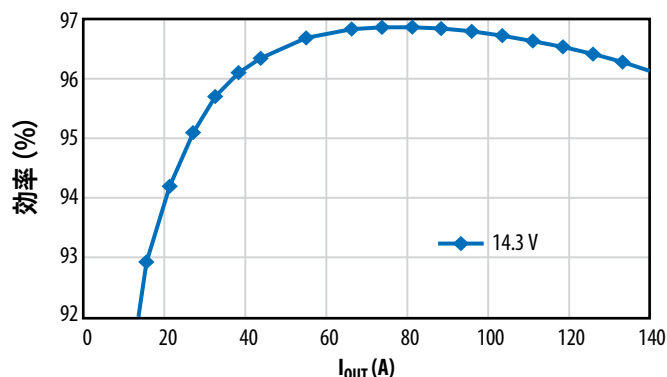


図6. 500 kHz、48 V入力、14.3 V出力で測定したコンバータの効率

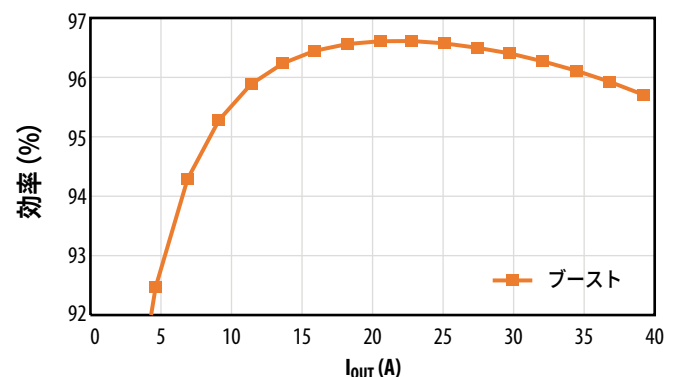


図7. 500 kHz、14.3 V入力、48 V出力で測定したコンバータの効率

結論

このアプリケーション・ノートでは、マイルドハイブリッド車やバッテリー電源のバックアップ・ユニット向けの4個のパッケージ封止eGaN FET (EPC2302) を使う双方向大出力コンバータEPC9165を紹介しました。48 Vと14.3 Vの間で変換する場合、500 kHzのスイッチング周波数で効率が96%を超えます。この設計は、1.5 kW~6 kWの電力範囲における48 V/12 Vの間の双方向コンバータに必要なサイズ、コスト、高い信頼性の優先順位を満たしています。

参考文献

- [1] A. Lidow, M. De Rooij, J. Strydom, D. Reusch, and J. Glaser, *GaN Transistors for Efficient Power Conversion*, 3rd ed. John Wiley & Sons, 2019. ISBN: 978-1119594147.
- [2] EPC. (2022). “EPC2302 datasheet,” [Online]. Available: https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/datasheets/EPC2302_datasheet.pdf
- [3] MPS (2022). “MPQ1918-AEC1, 100V, 1.6A, 5A, EMI-Optimized Half-Bridge GaN Driver, AEC-Q100 Qualified” [Online]. Available: <https://www.monolithicpower.com/en/mpq1918.html>
- [4] Vishay (2020). “IHTH-1125KZ-5A high current through-hole inductor high temperature series,” [Online]. Available: <https://www.vishay.com/docs/34349/ihth-1125kz-5a.pdf>
- [5] Microchip Technology Inc. (2019). 16-bit PIC Microcontrollers Family, [Online]. Available: <https://www.microchip.com/design-centers/16-bit>
- [6] “EPC9165 - 2 kW 48 V/14 V Bi-Directional Power Module Evaluation Board,” Efficient Power Conversion Quick Start Guide



詳細については、

Info@epc-co.comに電子メールで、またはお近くの販売代理店にお尋ねください

EPCのウェブサイト: epc-co.com/epc/jp/
bit.ly/EPCupdates に登録、または22828に「EPC」とテキストリングすれば、EPCの最新情報を受信できます



eGaNは、Efficient Power Conversion Corporation, Inc.の登録商標です