

AEC認定のeGaN® FETを使って48 Vと12 Vの間の1.5 kW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自動車の10台に1台が、48 Vのマイルドハイブリッド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倍の出力を供給し、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の範囲の電力を備えた48 Vと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、および高い信頼性です。

このアプリケーション・ノートでは、効率95%で動作する車載品質認定 GaN FETを使った48 Vと12 Vの間の1.5 kW、2相双方向コンバータの設計について説明します。放熱能力は、最終的に、ユニットがシャーシに取り付けられた状態で車内で機能するため、無限と見なすことができます。このコンバータの設計は、2つのコンバータを並列化することによって、3 kWまで拡張可能です。

双方向DC-DCコンバータの設計

双方向DC-DCコンバータの簡略図を図1に示します。同期昇降圧コンバータが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。こ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あります。

48 Vの用途で使われるGaN FETは通常、同様のMOSFETと比べて、4倍優れた性能指数FOM (figure of merit、チップ面積・オン抵抗 R_{ON}) が得られます [1]。ゲート電圧が5 Vで同じとき、GaN FETのゲート電荷は、MOSFETの少なくとも1/5になります。GaN FETの他の重要な利点には、より小さい出力容量 C_{OSS} 、より速い電圧遷移、逆回復電荷ゼロがあり、そして物理的に小型です。

この設計では、AEC-Q101認定のeGaN FETであるEPC2206 [2] を使っています。 R_{ON} が2.2 m Ω で、定格ピーク直流電流は90 Aです。したがって、FETの電流要件の低減などのために、2相のアプローチを選択しました。つまり、12 Vで1.5 kW出力のとき、各相の直流電流は62.5 Aです。これによって、コイルの定格電流要件も軽減されます。

米ビシェイ・インターテクノロジーのコイルIHTH-1125KZ-5Aシリーズ [3] は、1 μ Hおよび2.2 μ Hのコイルに対して大きな電流定格を提供します。この設計では、インダクタンス値とスイッチング周波数は、分析損失モデルを使って決定されるため、50%から全電力までの効率が最適化されます。2.2 μ Hのコイルと250 kHzのスイッチング周波数を選ぶと、コイルのピーク電流70 Aが得られます。

相電流バランスを正確にするためには、コイルの直流抵抗DCRの電流検出よりも、高精度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大きくなります。このインダクタンスによって、大

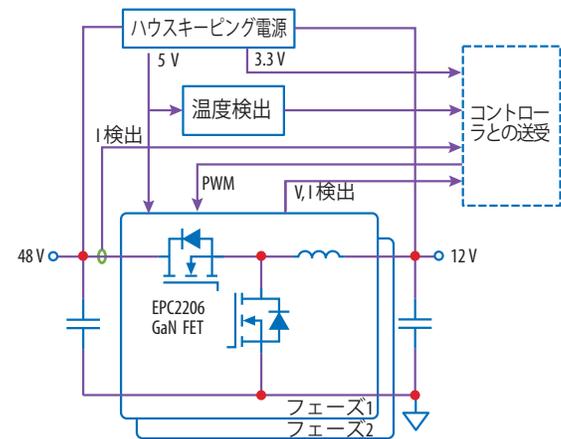


図1. 双方向コンバータの簡略化された回路ブロック図。

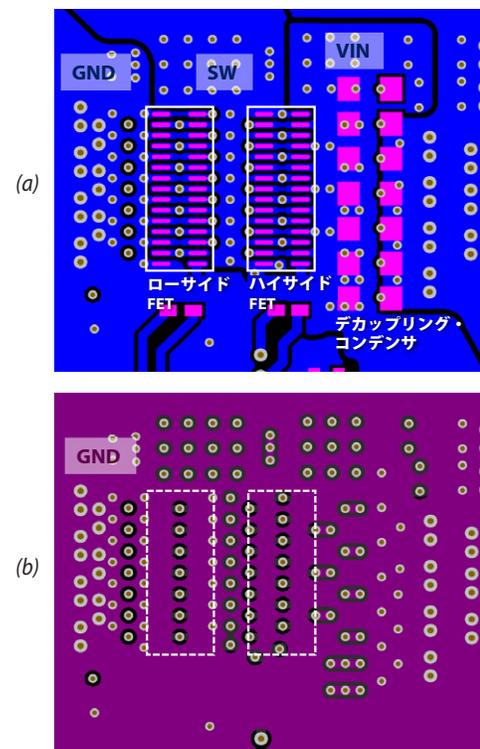


図2. GaN FET周辺のプリント回路基板の上部2層のレイアウト例: (a) 接地 (GND)、スイッチング・ノード (SW)、入力 (V_{IN}) の回路網で構成した最上層、および (b) 中間層1のしっかりした接地面。

きな雑音が発生し、電流検出アンプが飽和して、測定が無効にな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、電流検出アンプにMCP6C02を使っており、最大帯域幅は500 kHz、利得は50 V/Vです。これによって、0.2 m Ω のシャントに対して全電流検出利得10 mV/Aが得られます。

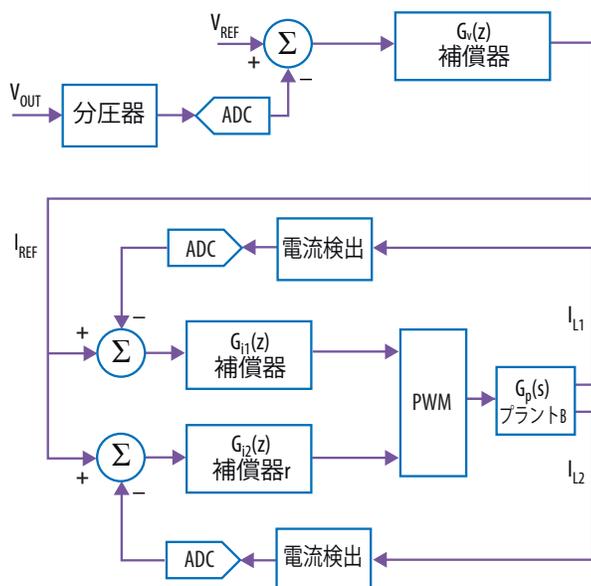


図3. デジタル平均電流モード制御の回路ブロック図。

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ミスマッチによる他の影響を最小限に抑える上でも重要です。図2に、この設計のGaN FET周辺のレイアウト例を示します。下にしっかりとした接地面を備え、FETの近くにデカップリング・コンデンサを配置することによる最適なレイアウト手法 [1] を使っています。

デジタル制御

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 [4] 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、高分解能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の分解能が得られるので、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、降圧モードと昇圧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、0.2 mΩの低損失検出抵抗と低雑音アンプ MCP6C02 を使っています。制御回路ブロック図を図3に示します。2つの独立した電流ループに対して、同じ電流リファレンス I_{REF} にしています。この結果、両方のコイルの電流が同じ値に安定化されます。2つの内部電流ループの帯域幅は6 kHzに設定され、外部電圧ループの帯域幅は800 Hzに設定されています。

温度管理

1.5 kWの最大出力電力では、GaN FETにヒートシンクが必要です。標準の市販の1/8ブリック・ヒートシンクを使っています。ヒートシンクを実装するための適切なクリアランスを提供するために、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

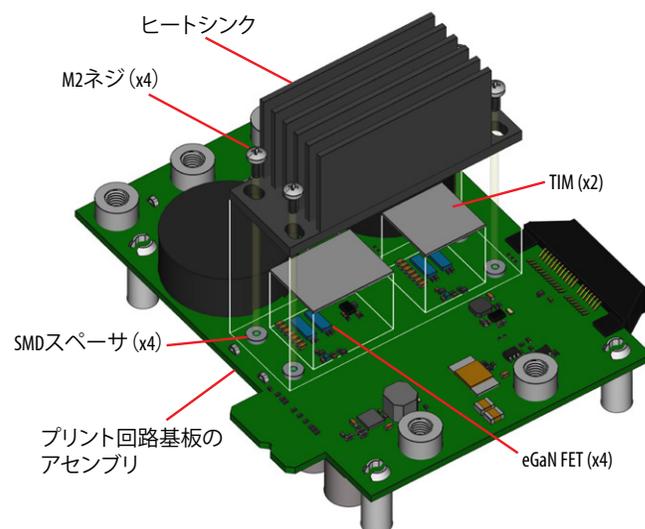


図4. ヒートシンクの設置図。金属スペーサ、熱伝導材料を示しています。

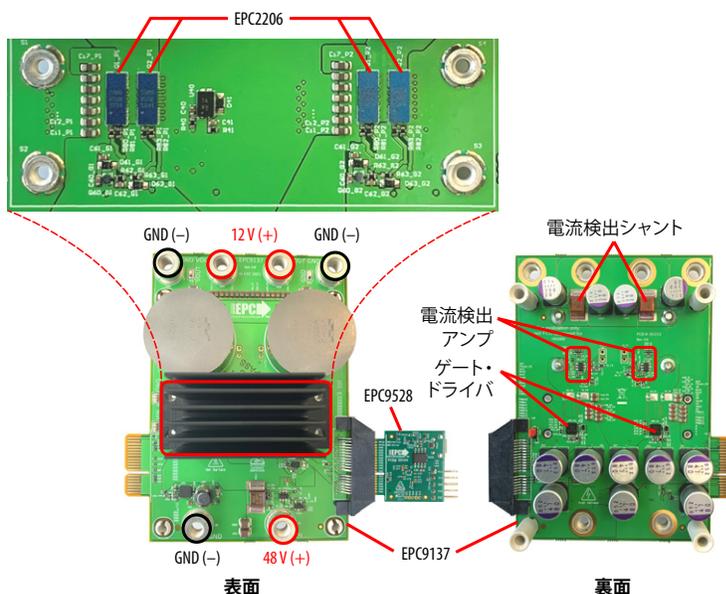


図5. EPC9528搭載コンバータEPC9137の写真。コントローラ・モジュールdsPIC33CKを装着。

には、熱伝導材料 (TIM) 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) 良好な熱伝導率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は、ヒートシンクの3次元設置図です。

実験結果

図5は、ヒートシンクが実装されている場合と、実装されていない場合のコンバータEPC9137 [5] の写真です。大きさは、エッジ・コネクタを除いて4 X 2.8 X 1.6インチ (102 X 70 X 40 mm) です。

ヒートシンクを実装し、エアフローを1700 LFMにして、コンバータを48V入力、13.8V出力で動作させ、250kHzと500kHzの両方でテストしました。効率の結果が図6です。250kHzで、2.2μHのコイルを使ったとき、このコンバータのピーク効率は97%が得られました。1.0μHのコイルを使って500kHzで動作させた場合、コンバータのピーク効率は95.8%でした。図7に示すように、このコンバータは、昇圧モード動作に対して、13.8V入力、48V出力でもテストしました。

全負荷時、EPCのeGaN FETは、スイッチング周波数250kHzのとき、効率96%で動作でき、最大スイッチング周波数100kHzでのコイル電流の制限によって、600W/相に制限されているシリコン・ベースのソリューションと比べて、750W/相が可能になります。

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向けの高出力双方向コンバータEPC9137と、AEC-Q101認定eGaN FETのEPC2206を4個使ったバッテリー電源バックアップ・ユニットを紹介しました。48Vと13.8Vの間で変換するとき、効率はスイッチング周波数250kHzで96%以上、500kHzで95%を超えます。

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. (2021). "EPC2206 datasheet," [Online]. Available: https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/datasheets/EPC2206_datasheet.pdf
- [3] 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>
- [4] Microchip Technology Inc. (2019). 16-bit PIC Microcontrollers Family, [Online]. Available: <https://www.microchip.com/design-centers/16-bit>.
- [5] "EPC9137 - 1.5 kW 48 V/12 V Bi-Directional Power Module Evaluation Board," Efficient Power Conversion Quick Start Guide

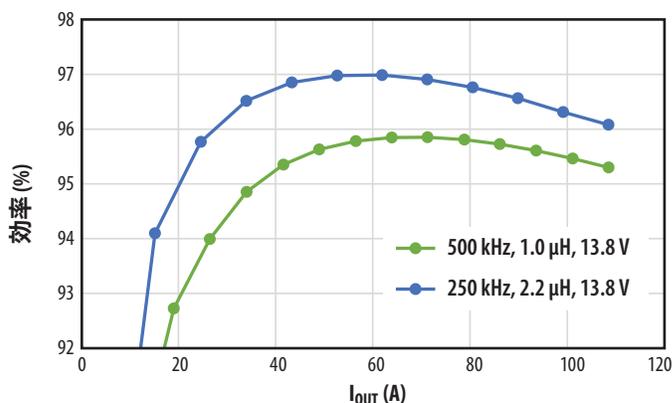


図6. 48V入力、13.8V出力のとき、250kHzと500kHzで測定されたコンバータの効率。

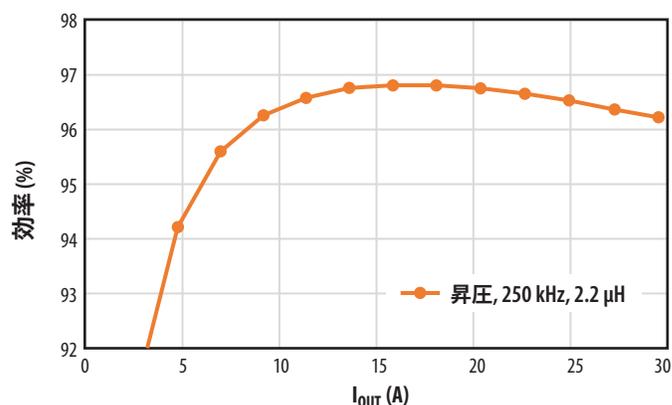


図7. 13.8V入力、48V出力のとき、250kHzで測定されたコンバータの効率。



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

キスティングすれば、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