

車載品質のeGaN® FETを使って小さな低電圧 BLDCモーター駆動用インバータを設計する方法



動機

非常に高効率で小型なモーター駆動用途に対する需要がますます高まっているため、EPCはeGaN FETベースの基板EPC9145を設計し、モーター駆動用インバータの分野で最大の性能を実現するためのリファレンス・デザインを提供します。EPC9145は、1 kWで動作可能な3相インバータ基板です；直流48 Vの供給電圧で電力を供給されると、ヒートシンクなしで1相（フェーズ）当たり15 A_{RMS}を供給でき、eGaN FETのパッケージから周囲温度まで、わずか50°Cの温度上昇で、最高PWM（パルス幅変調）スイッチング周波数250 kHzをサポートします。この基板は、ヒートシンクを使うと、1相当たり連続20 A_{RMS}を供給でき、ピーク動作では最大30 A_{RMS}です。

システムの概要

インバータ基板には、以下に説明するように、モーター駆動用の完全なインバータを構成するために必要なすべての機能回路が含まれています：

- 6個のeGaN FET (EPC2206) に基づく3相インバータ
- ゲート・ドライバ
- 直流リンク・コンデンサ
- 安定化された補助電源
- 調整回路を備えた電圧、電流、温度のセンサー
- 保護機能

図1はインバータ基板の写真で、インバータのレッグのパワー・ユニットの拡大図も示します。コントローラのコネクタ (J60) で、EPC9145の信号を外部のデジタル・マイクロコントローラ・ユニットと接続します。

スイッチング・セルは、対称なレイアウトで配置されています。このゲート・ドライバの集積回路は、接続の長さを短くするために、パワー・デバイスに対応して基板の裏面に配置されています。このレイアウト・ソリューションによって、ゲート・ドライバ回路のループ・インダクタンスを最小限に抑えて、高速遷移を実現し、小さく保つことができます。

相の出力電流は、シャント抵抗を介して測定します。各相の下側デバイスのソース経路に同相の検出抵抗があります。さらに、互換性のあるモーター・シャフト・エンコーダまたはホール効果センサーを、コネクタJ80を介してモーター制御駆動用インバータEPC9145に接続でき、フィルタした出力信号をコネクタJ60のマイクロコントローラで利用できます [1]。

過電流 (OC) が発生すると、内蔵の過電流検出回路がトリガーされます。基板上にJ_{OCpN}ジャンパを挿入することによって、過電流の期間中、PWM信号が自動的に局所的にディセーブルになり、マイクロコントローラのコマンドが優先されます。OC信号は、J_{OCpN}の設定に関係なく、J60コネクタを介してマイクロコントローラに送信されます。

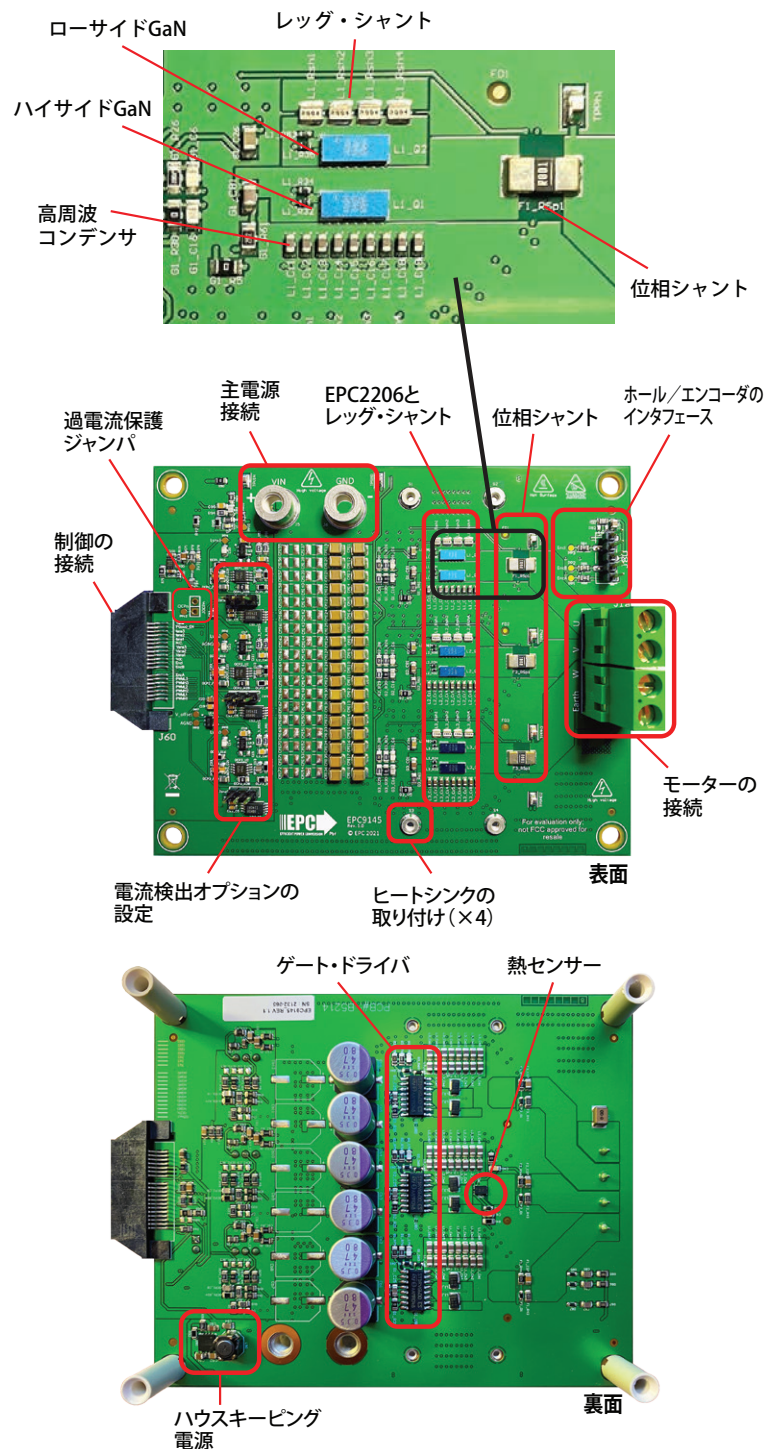


図1. 主要な部分を強調したEPC9145基板の写真の概観。

直流リンク・コンデンサは、直流入力電圧とインバータとの間の変動する瞬間的な電力交換のバランスを取り、インバータの高周波パワー・スイッチング回路によって引き起こされるリップルをフィルタします。スイッチング周波数が高いと、必要な容量値を減らすことができます。このため、直流リンクは、セラミック・コンデンサと電解コンデンサによって実現され、ユーザーは、高いスイッチング周波数と低いスイッチング周波数の両方の動作条件で最適なフィルタを見つけるために、EPC9145をカスタマイズすることができます。

EPC9145には、自然対流冷却における専用ヒートシンクを備えており、周囲温度を超える適切な温度上昇で、効率的な熱動作状態を維持します。自然対流ヒートシンクを図2に示します。

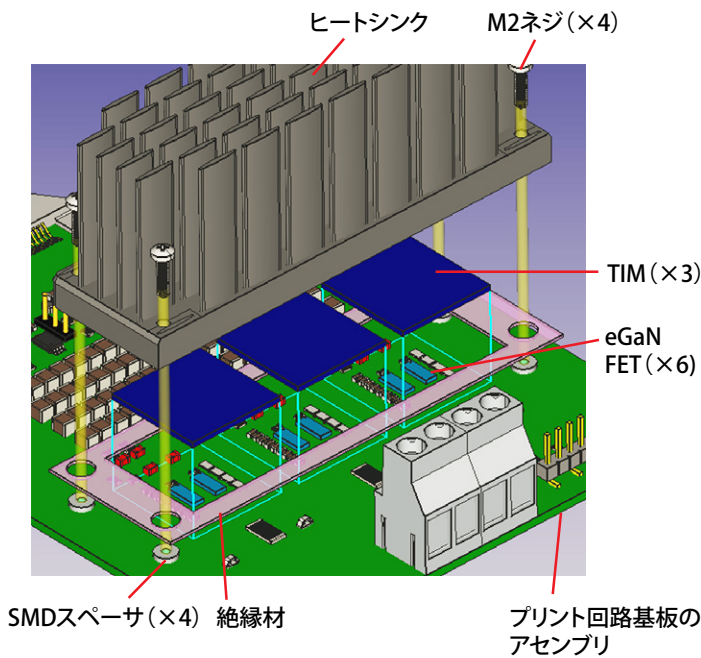


図2. ヒートシンクを基板に取り付けるための詳細。

このヒートシンクは接地されており、ピンの導体が露出している他の部品との短絡を防ぐために、絶縁材料の薄い層の上に取り付けられています。熱伝導材料 (TIM) が、eGaN FETの上に配置され、チップと、取り付けられたヒートシンクとの間の界面の熱伝導率を改善します。TIMの選択は、次の視点に基づいています：

- 熱伝導を高めるには、熱伝導率が大きくなければなりません。
- スwitching・ノードと、接地への熱接続との間に適切な電氣的絶縁を提供するには、高い絶縁耐力が必要です。
- 最大2対1の圧縮に耐えられる必要があります。熱特性を最大化するために、機械的な熱信頼性を最大化する機械的力を制限することを推奨します。

モーター駆動用インバータ向けeGaN FETの選択

EPC9145は、6個のEPC2206 (eGaN FET) で構成された3相インバータを搭載しています。

窒化ガリウム・デバイス技術は、電子移動度が非常に高く、温度係数が小さくなっています。eGaN FETのEPC2206は、ドレイン-ソース間のオン抵抗 $R_{DS(ON)}$ の標準値が $1.8 \text{ m}\Omega$ (25°C) と小さくなっています。

さらに、eGaNデバイスの横型構造と、固有のボディ・ダイオードがないため、逆導通で動作したとき、ゲート電荷 Q_G が非常に小さく、逆回復電荷 Q_{RR} がゼロです。同様の $R_{DS(ON)}$ のMOSFETと比べると、eGaN FETはスイッチング損失が1/5なので、このインバータは、より高いPWM周波数と小さいデッドタイムで動作できます。高いPWM周波数と小さいデッドタイムによって、直流リンクにセラミック・コンデンサのみを配置すれば済むため、信頼性が向上し、コストとサイズを削減できます。

eGaN FETのチップスケール・パッケージ (CSP) を使うと、ドレイン接続とソース接続をクシ状に交互配置して、チップをプリント回路基板に直接はんだ付けすることによって、共通ソースとパワー・ループの寄生インダクタンスを減らすことができます。実装面積が小さいため、この基板の比較的小さな領域に6個のEPC2206を実装して、高い電力密度を得ることができます。EPC2206の外形が図3です。

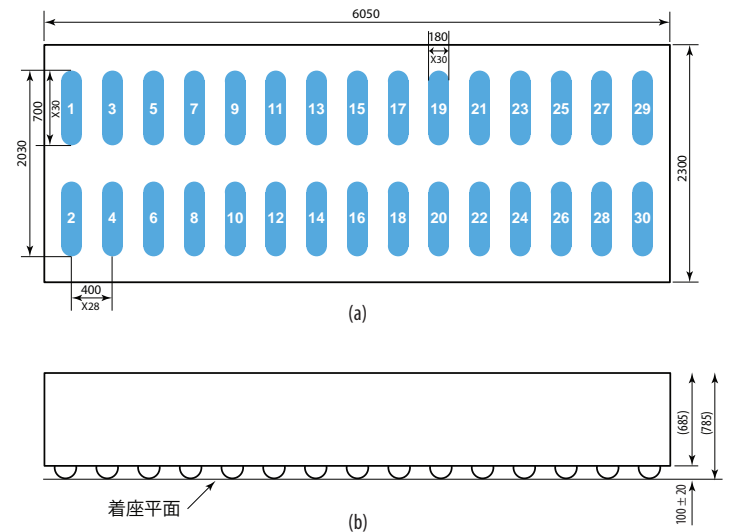


図3. はんだバーを備えたパッシブしたチップ形式のEPC2206のeGaNパッケージ: a) 表面図、b) CSPの側面図。

設計の概要

パワー段のeGaN FETの最大電圧は、ドレイン-ソース間電圧 $V_{DS}=80V$ です。このドライバ回路は、スイスのSTマイクロエレクトロニクス製の3個のゲート・ドライバSTDRIVEG600によって構成されています [2]。eGaN FETは、5 Vのゲート電圧を印加することによってオンさせ、ゲート電圧は安全に最大定格6 V以下に保ち、信頼性の高い動作を保証します。eGaN FETは、ゲートに0 Vを印加すればオフします。

ゲート抵抗は、 di/dt と dv/dt の設定に役立ち、EPC9145では 10Ω に設定されており、スイッチング・ノードでオーバーシュートすることなく減衰した過渡電圧(9 V/ns)が得られます。

この電流は、位相シャントまたはレッグ・シャントの抵抗のいずれかを使って、レッグごとに双方向に検出されます。電流検出方法は、ジャンパ J_{sns1} 、 J_{sns2} 、 J_{sns3} を使って選択できます。位相またはレッグの検出の両方で、シャントの値は $1.0\text{m}\Omega$ であり、シャントの両端の電圧降下は利得 20mV/A で増幅され、 1.65V のオフセット電圧が追加されます。アンプの帯域幅は 400kHz で、高いスイッチング周波数動作での正確なモーター制御に適しています。すべてのレッグのスイッチング・セルの高周波パワー・ループのインダクタンスを低減するために、レッグ・シャントは、 $4.0\text{m}\Omega$ の0805幅の抵抗を4個並列接続して構成されています。ジャンパ J_{snsx} の位置に応じて、位相シャント抵抗またはレッグ・シャント抵抗に加わる増幅された信号を使って、各レッグの過電流を検出し、アナログ回路の保護を迅速に動作させます。アクティブ・ローの過電流信号(OCpn)も、適切な故障処理のためにマイクロコントローラのコネクタJ60に送信されます。中央揃いの対称PWMを使う従来のフィールド・オリエンテッド制御(FOC)アルゴリズムでは、この電流は、PWM周期の中央に対応するローサイド・スイッチのオン状態の中央点で測定されるため、使用可能な2つの検出方法は同等です。ローサイド・スイッチがオンのとき、位相の電圧は低く、位相の電流は、位相検出抵抗とレッグ検出抵抗の両方に流れます。したがって、位相とレッグの増幅された信号はオーバーラップします(図4の黄色とピンク色の信号)。

位相およびレッグのシャント電流信号が図4です。アナログ-デジタル変換器のサンプリング点は、小さな円で強調表示されています。

過電流(OC)検出回路は、 50A を超える正または負の電流が3つの位相のいずれかで測定された場合にトリガーされます。この状態では、アクティブ・ローのOCpn信号は、 $3.6\mu\text{s}$ のRC時定数によって決定される短時間、ローのままになります。図5に示すように、ジャンパ J_{OCpn} が取り付けられている場合、すべてのPWM信号はゲート・ドライバによってディセーブルにされます。OCpn信号は、コネクタJ60を介してマイクロコントローラの専用割り込みピンに送信されます。マイクロコントローラの反応は、それに従ってプログラムすることができ、反応時間は速くなります。ジャンパ J_{OCpn} が挿入され、コントローラがOCpn信号を無視するようにプログラムされている場合、EPC9145は、サイクルごとの制限に関与することによって、位相の電流を 50A_{peak} に制限できます。これは図5に示されています。ここで、上側の灰色の曲線は $\pm 50\text{A}$ の各ピークで制限される位相電流です。図5の下側には、正の電流ピーク

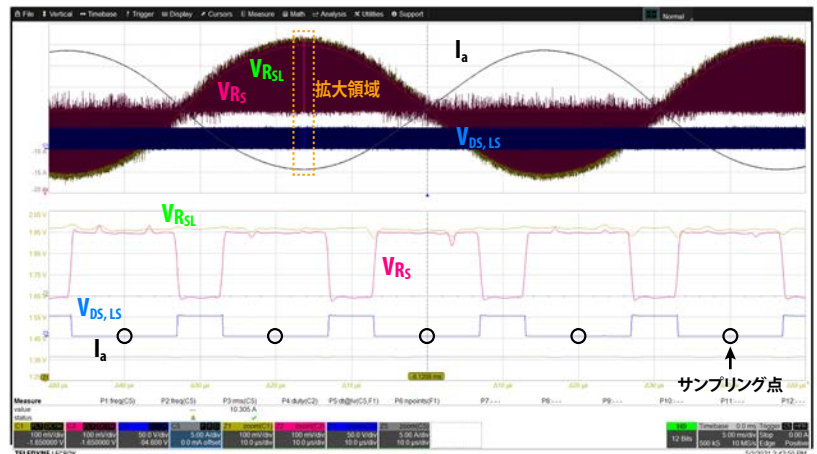


図4. 位相およびレッグの電流検出信号。スイッチング周期中の実験波形と拡大図。アナログ-デジタル変換信号のサンプリング点の位置が強調表示されています。
 $I_a=5\text{A/div}$ 、 $V_{DS,LS}=50\text{V/div}$ 、 $V_{RS}=V_{RSL}=100\text{mV/div}$ 、 $t=5\text{ms/div}$ 、
 拡大図 $t=10\mu\text{s/div}$ 。



図5. 位相電流、レッグ電流の検出信号、およびOCpn信号。スイッチング周期中の実験波形と拡大図。C5の灰色 20A/div は外部電流プローブで測定された位相電流、C1の黄色 1V/div はOCpn、C2のピンク色 500mV/div は増幅されたレッグ・シャント電流信号です。 $t=50\text{ms/div}$ 、拡大図 $t=50\mu\text{s/div}$ 。

に対応する拡大図があります。ここには、位相電流(灰色)、OCpn信号(黄色)、およびレッグ・シャントの増幅信号(ピンク色)が表示されています。

直流供給電圧と各位相の電圧は、 40.5mV/V の合計利得を生成する抵抗分割器ネットワークを使って測定されます。

インバータ基板の温度検出器(U40 - AD590)は、次の式を使って、温度に比例するJ60コネクタの電圧をフィードバックします。

$$T = \left(\frac{V \cdot 1000}{7.87} \right) - 273.16 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (1)$$

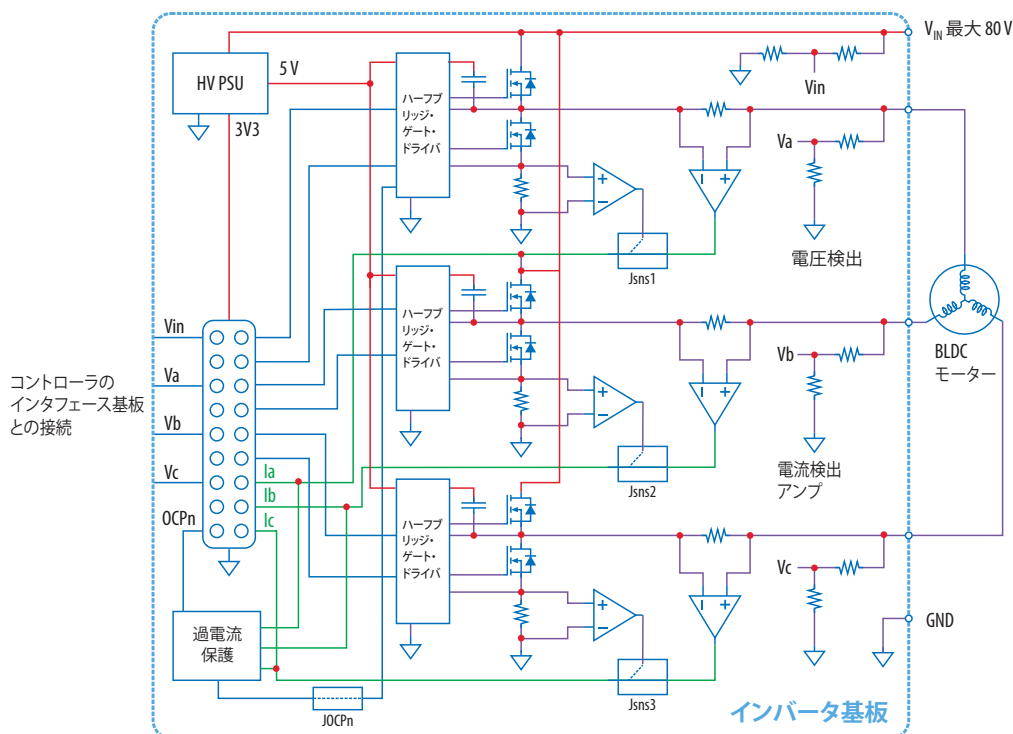


図6. EPC9145の回路ブロック図。

実験的検証

電源基板EPC9145は、使用目的に応じて、以下の構成が可能です：
 モーター駆動用インバータ；マルチフェーズ同期バック・コンバータ；
 フルブリッジ同期バック・コンバータです。実験的な検証のために、この基板は、3相BLDCモーター駆動用インバータ向けに構成され、これが最適化されたメイン・モードだからです。

図6は、EPC9145の回路ブロック図です。

この基板は、センサーレスまたはセンサー付きのモーター制御のいずれかに使えます。

EPC9145は、空間ベクトル・パルス幅変調 (SVPWM) を使ったセンサーレスFOCアルゴリズムを備えた米Teknicの400 W のM-3411P-LN-08D NEMA 34 ACモーター [3] に電力を供給し制御するように事前にプログラムされた**EPC9147C** (モーター駆動用コントローラのインタフェース基板：STマイクロエレクトロニクスのSTM32G431RB Nucleo) と連携します。このインバータのスイッチングPWMは、50 kHz に設定され、デッドタイムは100 nsです。図7では、モーターの位相電流と、位相からPGNDへの電圧の波形は、EPC9145がヒートシンクなし、空気の対流なしで、モーターの各位相に10 A_{RMS}を供給していることを示しています。図8の赤外線写真は、上記の条件で、温度が周囲温度に対して30°C以上に上昇していることを示しています [4]。

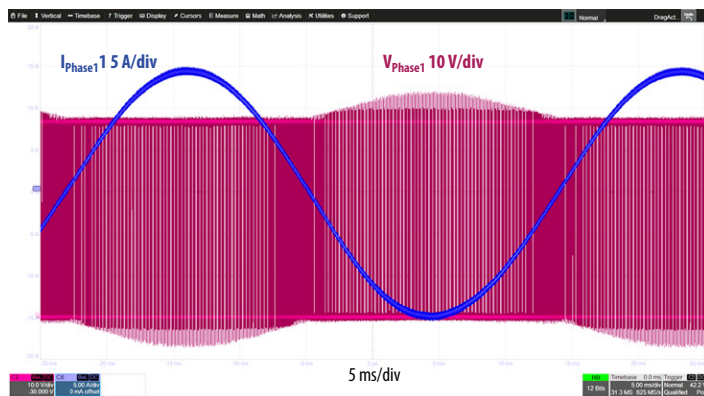


図7. 48Vで動作し、モーターの位相電流ごとに10 A_{RMS}を供給するPGNDを基準としたEPC9145の位相1の電流と位相1の電圧。

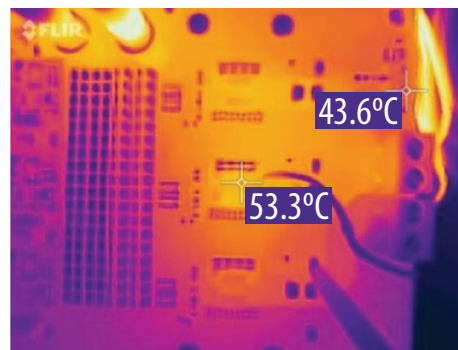


図8. ヒートシンクのないEPC9145基板の赤外線写真。

$T_{\text{ambient}} = 23^{\circ}\text{C}$ 、空気対流のなしで
 相電流10 A_{rms}のとき $T_j - T_{\text{ambient}} = 30^{\circ}\text{C}$ 。

図9のグラフは、プリント回路基板の裏面において熱電対で測定された温度と、自然対流冷却のみを使ったときのチップのパッケージ温度との相関関係を示しています。

インバータの入力電圧のリプルは、入力容量とPWM周波数に反比例します。最大入力電圧の要件とPWM周波数が与えられると、必要な最小入力容量を決めることができます。ただし、低いPWM周波数(つまり20 kHz)では、必要な入力容量値によって、電解コンデンサ技術の利用が必要になります。使用する電解コンデンサの数は、インバータに必要な容量値ではなく、それらに流れる電流の実効値によって決まります。実用的な値は、位相出力に流れる7 A_{RMS}ごとに少なくとも1個の電解コンデンサを使うことです。PWM周波数を高くすると、必要な入力容量によって、それに流入する電流の実効値に基づいてサイズが設定されないセラミック・コンデンサを使えるようになります。

PWM周波数100 kHzでは、入力電圧と電流リプルが減少するため、設計者は電解コンデンサを取り外して、より小型・軽量で、より信頼性の高いセラミック・コンデンサのみを使用できます。これによって、インバータの大きさと重さが軽減されます。これらの条件では、基板にヒートシンクが取り付けられているため、EPC9145は1相当たり20 A_{RMS}を供給でき、周囲温度よりも50°C高くなります。

結論

EPC9145は、48 V入力、1 kW出力で、eGaN FETのEPC2206を搭載しています。3相BLDCモーターを高性能で動作させるために必要なすべての回路を統合しています。eGaNの高い電力密度と高い導電性によって、この基板は、各レッグに20 A_{RMS}を供給でき、自然対流の受動ヒートシンクの下で、温度上昇を50°C以下に保つことによって、最大250 kHzのPWMスイッチング周波数をサポートします。電流出力波形の品質、トルク振動の低減、およびシステム全体の効率の観点から、モーター駆動システムの性能向上を実現できます。

参考文献

- [1] EFFICIENT POWER CONVERSION, 2021. [Online]. Available: https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/schematics/epc9145_schematic.pdf.
- [2] STMicroelectronics, "STDRIVEG600 datasheet," 2021. [Online]. Available: <https://www.st.com/en/power-management/stdriveg600.html>.

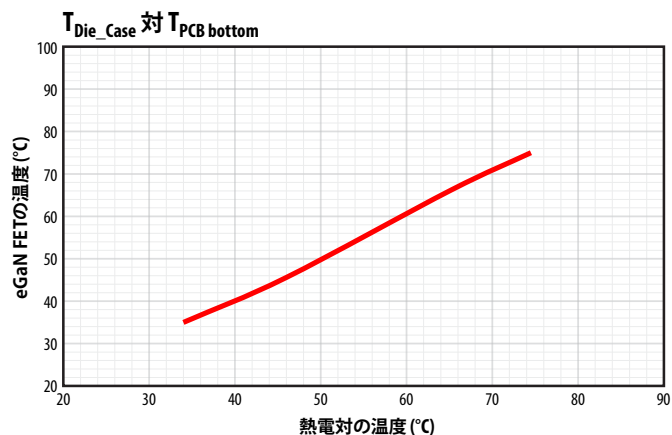


図9. eGaN FETのパッケージの温度と熱電対の温度。プリント回路基板の裏面に熱電対を配置。ヒートシンクなしの自然対流下での動作。

- [3] Teknic. [Online]. Available: <https://teknik.com/hudson-model/M-3411P-LN-08D/?registered=success>.
- [4] S. Musumeci, F. Mandrile, V. Barba, M. Palma, "Low-Voltage GaN FETs in Motor Control Application; Issues and Advantages: A Review," Energies, 2021.
- [5] EFFICIENT POWER CONVERSION, "Demonstration Board EPC9145 Quick Start Guide," 2021. [Online]. Available: https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/guides/epc9145_qsg.pdf.
- [6] EFFICIENT POWER CONVERSION, "EPC2206 – Automotive 80 V (D-S) Enhancement Mode Power Transistor," 2021. [Online]. Available: https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/datasheets/EPC2206_datasheet.pdf.
- [7] F. Mandrile, S. Musumeci, M. Palma, Dead Time Management in GaN Based Three-Phase Motor Drives, IEEE EPE, 2021.



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