

# 評価基板EPC9173を使って電動自転車の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、電動自転車用インバータの最大性能を実現するためのレファレンス・デザインを提供するために、eGaN ICベースの基板**EPC9173**を設計しました。EPC9173は、6個のeGaN IC (**EPC23101**)に基づいています。このような基板は、最大1.5 kWの動作が可能な3相インバータです; 直流48 Vの電源で電力を供給すると、ヒートシンクなしで1相当たり20 A<sub>RMS</sub>を供給できます。ヒートシンクを使うと、1相当たり25 A<sub>RMS</sub>を連続的に提供でき、ピーク電流は最大35 A<sub>RMS</sub> (時間間隔が30秒以下の場合) です。EPC9173は、最高250 kHzのPWM (パルス幅変調) スイッチング周波数をサポートします。

## 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、電動自転車のモーター駆動向けの完全なインバータをサポート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 IC (**EPC23101**) に基づく3相インバータ;
- 直流リンク・コンデンサ;
- 安定化された補助電源;
- 調整回路付きの電圧、電流、温度のセンサー;
- 保護機能

このインバータ基板の写真が図1です。

コントローラのコネクタ (J60) を使って、EPC9173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、対称的なレイアウトで配置されています。この位相の出力電流は、シャント抵抗を介して測定されます。各相の下側デバイスのソース経路には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用駆動インバータEPC9173に接続することができ、フィルタ処理された出力信号をコネクタJ60を介してマイクロコントローラで使えます [1]。

過電流 (OC: overcurrent) 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。OC信号は、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。

直流リンク・コンデンサは、バッテリーとインバータ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生じるリップルを安定させます。高いスイッチング周波数によって、必要な容量値を下げるすることができます。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、EPC9173をカスタマイズして、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ことができます。

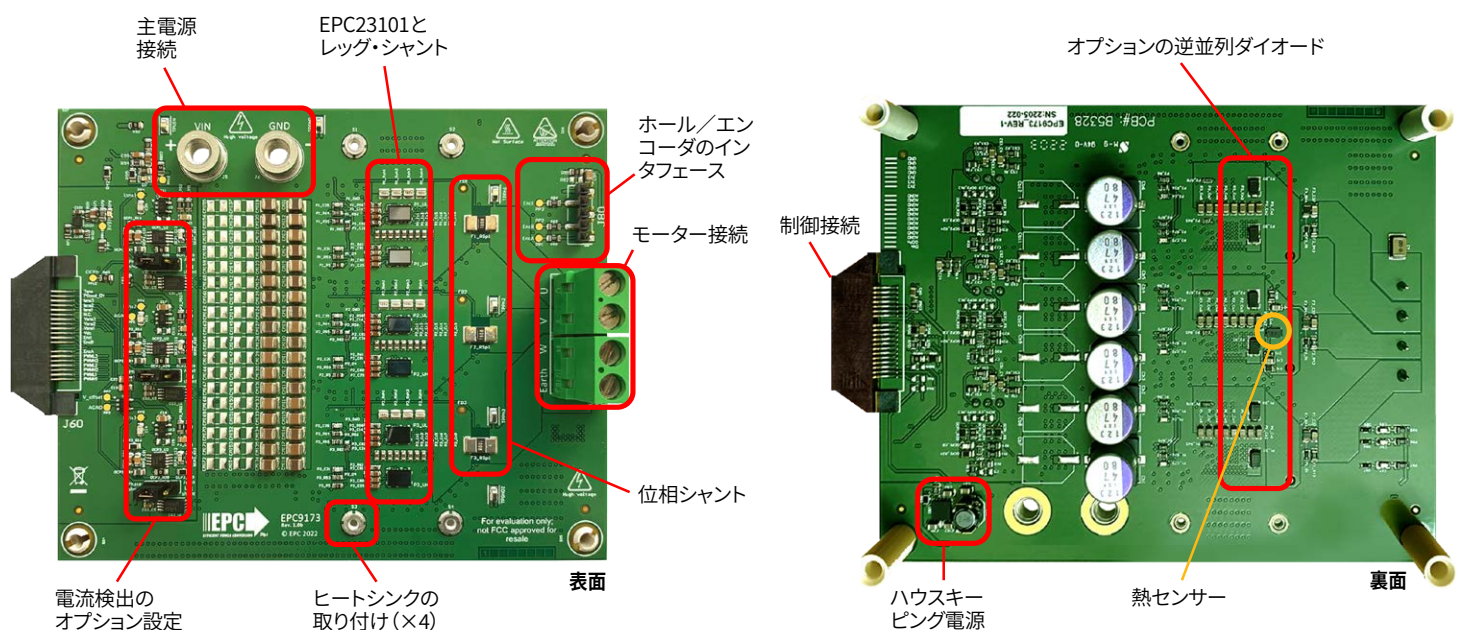


図1. EPC9173基板の主要な部分を強調した全体写真

EPC9173は、図2に示す自然対流冷却専用のヒートシンクを備えています。

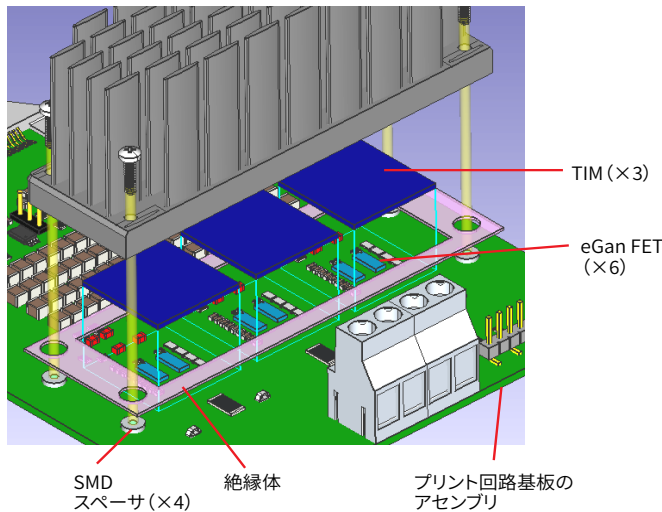


図2. ヒートシンクを基板に取り付けるときの詳細

ヒートシンクは接地され、ピンの導体が露出した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実装されています。熱伝導材料 (TIM: thermal interface material) がeGaN ICの上に配置され、チップと実装したヒートシンクとの間の界面の熱コンダクタンスを改善します。この基板に使われているTIMは台湾のT-グローバルテクノロジーのt-Global P/N: TG-A6200×0.5 mmで、導電率は6.2 W/m・Kです。

### モーター駆動用インバータ向けのeGaN ICの選択

EPC9173は、6個のeGaN IC (EPC23101) で構成された3相インバータです。

窒化ガリウム・デバイス技術は、非常に高い電子移動度と低い温度係数を備えています。eGaN ICのEPC23101のドレイン・ソース間オン抵抗 $R_{DS(on)}$ は、標準値で2.6 mΩ (@25°C) です。

加えて、eGaNデバイスの横型構造と固有のボディ・ダイオードがないことによって、逆導通で動作したときに、非常に小さいゲート電荷 $Q_G$ と逆回復電荷 $Q_{RR}$ ゼロが得られます。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と小さいため、インバータは、より高いPWM周波数とより短いデッドタイムで動作できます。高いPWM周波数と短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できるため、信頼性が向上し、コストとサイズを削減できます。通常、従来の電動自転車の設計では、電磁放射規制に準拠するために、バッテリーとインバータの間にLCフィルタが挿入されます。EPC9173を100 kHzで使う場合、入力フィルタを排除することができます。

eGaN ICのチップスケール・パッケージ (CSP) は、ドレインとソースの接続をクシ状に配置し、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、6個のEPC23101を基板の比較的小さな領域に実装して、高い電力密度を実現できます。EPC23101のフットプリントが図3です。

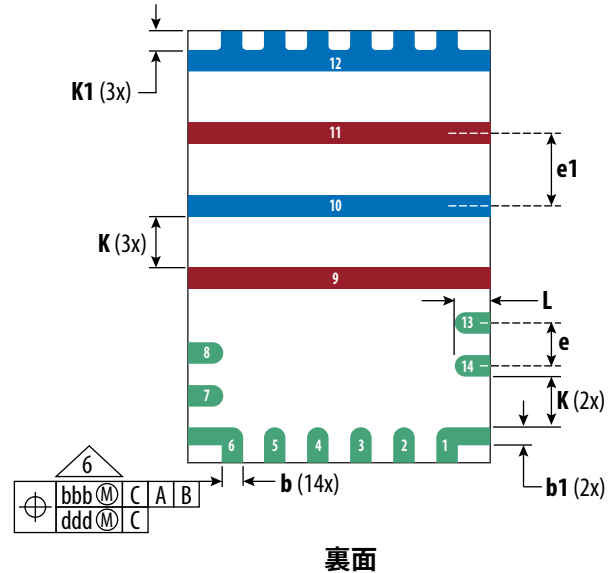


図3. EPC23101のeGaNパッケージのフットプリントの裏面図

### 設計の概要

パワー段のeGaN ICの最大電圧は $V_{DS} = 100$  Vです。 $dV/dt$ は、モーター駆動用途向けに最適化され、10 V/ns以下です。

電流は、位相シャント抵抗またはレッグ・シャント抵抗のいずれかを使って、各レッグごとに両方向で検出されます。電流検出方法は、ジャンパ $J_{sns1}$ 、 $J_{sns2}$ 、 $J_{sns3}$ を使って選択します。位相検出またはレッグ検出の両方で、シャント値は1.0 mΩで、シャント両端の電圧降下は20 mV/Aの利得で増幅され、1.65 Vのオフセットが追加されます。このアンプの帯域幅は400 kHzで、高いスイッチング周波数の動作での正確なモーター制御動作に十分です。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 mΩの0805幅の抵抗を4個並列に配置して構成しています。ジャンパの位置に応じて、位相シャント抵抗またはレッグ・シャント抵抗の両端で増幅された信号を使って、各レッグの過電流を検出し、アナログ回路保護を迅速に動作させます。適切なフォールト処理のために、アクティブ・ローの過電流信号 (OCPn) もマイクロコントローラのコネクタJ60に送信されます。利用可能な2つの検出方法は同等です。これは、中心に位置合わせされた対称PWM変調を使う従来のフィールド・オリентッド制御 (FOC) アルゴリズムでは、PWM周期の中心点に対応する下側スイッチのオン状態の中央で電流が測定されるためです。ローサイド・スイッチがオンのとき、相の電圧は低く、相の電流は位相検出抵抗とレッグ検出抵抗の両方を流れます。したがって、位相増幅信号とレッグ増幅信号が重なります (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。A-Dコンバータのサンプリング点は、小さな円で強調表示されています。

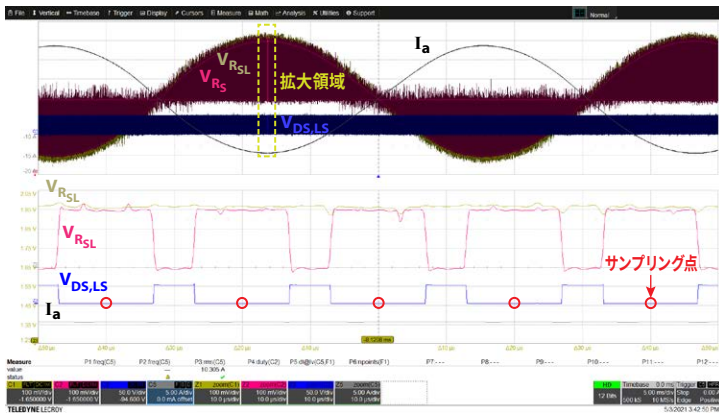


図4. 位相およびレグの電流検出信号。スイッチング周期中の実験波形と拡大図。アナログからデジタルへの信号のサンプリング点の位置が強調表示されます。  
 $I_a = 5 \text{ A/div}$ ,  $V_{DS,LS} = 50 \text{ V/div}$ ,  $V_{RS} = V_{RSL} = 100 \text{ mV/div}$ ,  $t = 5 \text{ ms/div}$ ,  
 拡大表示  $t = 10 \mu\text{s/div}$

過電流 (OC) 検出回路は、50 Aを超える正または負の電流が3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時定数によって決まる短い時間、ローのままになります。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、それに応じてプログラムすることができ、反応時間は高速です。

直流電源電圧と各相の電圧は、合計利得29.2 mV/Vを生成する抵抗分割網を使って測定されます。

インバータ基板の温度センサー (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。

$$T = \left( \frac{V \cdot 1000}{7.87} \right) - 273.15 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (1)$$

温度センサーは、EPC23101のパッケージの上部で温度を測定する赤外線カメラを使って実現されています。この関係を図5に示します。

温度センサーの特性評価

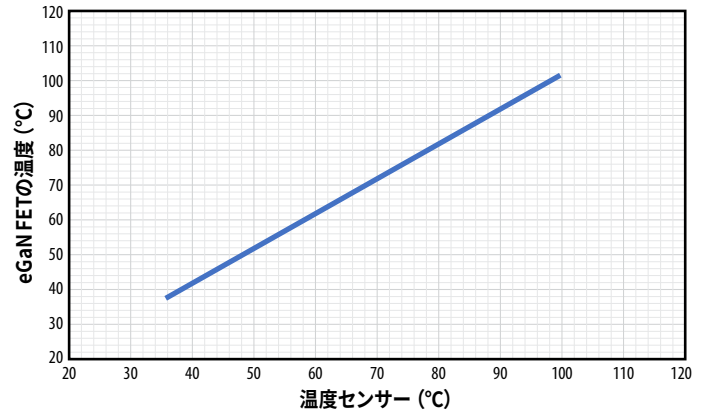


図5. eGaN ICのパッケージ温度とプリント回路基板の裏面に配置した温度センサーの関係。ヒートシンクなしの自然対流下での動作時。

実験的検証

実験的検証のために、電源基板EPC9173は、3相BLDCモーター駆動用インバータ向けに構成されています。これが最適化されたメイン・モードだからです。図6に、EPC9173の回路ブロック図を示します。この基板は、センサーレスまたはセンサー付きモーター制御のいずれにも使えます。

EPC9173は、400 WのACモーターである米TeknicのM-3411PLN-08D NEMA 34 [2] を空間ベクトル・パルス幅変調 (SVPWM) を使ってセンサーレスFOCアルゴリズムで駆動および制御するように事前にプログラムされたEPC9147C (スイスのSTマイクロエレクトロニクスのモーター駆動コントローラ用インタフェース基板ST-M32G431RB Nucleo) と結合されています。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。

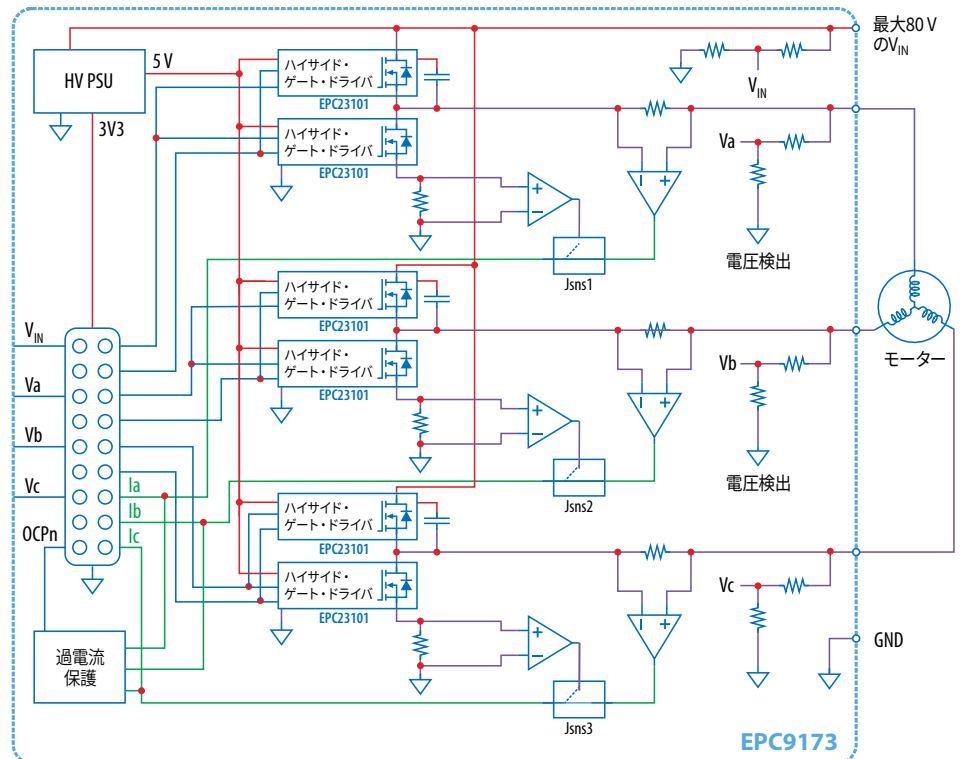


図6. EPC9173の回路ブロック図

## 実験的検証 (続き)

図7のグラフは、さまざまなPWM周波数での電流能力に対するeGaN ICの温度の周囲温度以上の上昇を示しています。実線は、ヒートシンクなしで自然対流がある場合の動作を表しています。破線は、自然対流のヒートシンクを使ったときです。この電流は、実験中に使われた電動自転車のモーターの損傷を避けるために、各位相ごとに27 A<sub>RMS</sub>以下に保たれています。

インバータの入力電圧リップルは、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使用が決まります。使われる電解コンデンサの数は、インバータが必要とする容量値ではなく、それらに流れる電流の実効値(RMS値)によって決まります。実際の値は、位相出力に流れる7 A<sub>RMS</sub>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周波数を高くする場合、必要な入力容量によって、それらに流れる電流のRMS値に基づかないサイズで決められるセラミック・コンデンサを使えます。

100 kHzのPWM周波数では、入力電圧と電流リップルが減少するため、電解コンデンサを取り除き、より小型軽量で信頼性の高いセラミック・コンデンサのみを使うことができます。これによって、インバータの体積と重さを削減できます。

## 結論

EPC9173は、電動自転車用途向けに設計されたeGaN ICのEPC23101を搭載し、48 V入力、1.5 kW出力です。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が統合されています。eGaNの高い電力密度と高い電気伝導率のおかげで、この基板は各レッグで最大25 A<sub>RMS</sub>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未満に保つことによって、最高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点で、モーター駆動システムの性能が向上します。

## GaN ICのEPC9173のデルタ温度@25°C

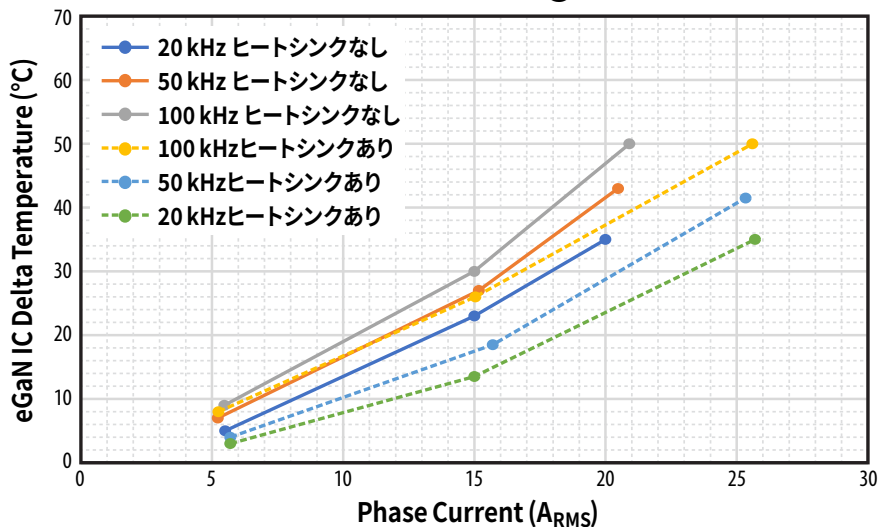


図7. GaN ICのEPC9173の温度上昇 (\*) 対周囲温度 [25.5°C]  
Measurements taken at various PWM frequencies.

(\*) ヒートシンクあり、接合部温度は直接測定していません。ヒートシンクを使って示されたデルタ温度は、ヒートシンクの底面で最も高温のポイントです。

## 参考文献

- [1] EFFICIENT POWER CONVERSION, 2021. [Online]. Available: [https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/schematics/epc9173\\_schematic.pdf](https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/schematics/epc9173_schematic.pdf)
- [2] Teknic. [Online]. Available: <https://teknic.com/hudson-model/M-3411P-LN-08D/?registered=success>
- [3] EFFICIENT POWER CONVERSION, "Demonstration Board EPC9173 Quick Start Guide," 2022. [Online]. Available: [https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/guides/epc9173\\_qsg.pdf](https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/guides/epc9173_qsg.pdf)
- [4] EFFICIENT POWER CONVERSION, "EPC23101 – ePower™ Chipset" 2021. [Online]. Available: [https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/datasheets/epc23101\\_preliminary.pdf](https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/datasheets/epc23101_preliminary.pdf)
- [5] S. Musumeci, F. Mandrile, V. Barba, M. Palma, "Low-Voltage GaN FETs in Motor Control Application; Issues and Advantages: A Review," *Energies*, 2021.
- [6] 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](mailto: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/](http://epc-co.com/epc/jp/)

[bit.ly/EPCupdates](http://bit.ly/EPCupdates) に登録



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