

評価基板のEPC9167とEPC9167HCを使った 電動自転車用モーター駆動インバータを設計する方法



動機

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**EPC9167**とEPC9167HCを設計して、電動自転車用インバータの最大性能を達成するためのリファレンス・デザインを提供しています。EPC9167は6個のeGaN FET (**EPC2065**) に基づいており、EPC9167HCは12個のeGaN FET (EPC2065) に基づいています。いずれの基板も、最大1 kWの動作が可能な3相インバータです；EPC9167HCは、直流48 Vで電力を供給されると、ヒートシンクなしでeGaN FETのパッケージから周囲まで、わずか50°Cの温度上昇で1相当り18 A_{RMS}を供給でき、ヒートシンクを使うと、1相当り連続で25 A_{RMS}、ピーク動作で最大35 A_{RMS}を供給できます。どちらも最大PWM (パルス幅変調) スwitching周波数250 kHz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個または12個のeGaN FET (**EPC2065**) 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、温度の各センサー；
- ・保護機能；

インバータ基板の写真と、インバータのスイッチング・セルの拡大図が図1です。コントローラのコネクタ (J60) は、EPC9167の信号を外部のデジタル・マイクロコントローラ・ユニットとインタフェースします。

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。ゲート・ドライバ集積回路は、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、基板の裏側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・ドライバのループの漏れインダクタンスを最小限に抑えて、高速遷移を実現し、損失を減らすことができます。

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、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インバータEPC9167に接続でき、フィルタ処理され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]。

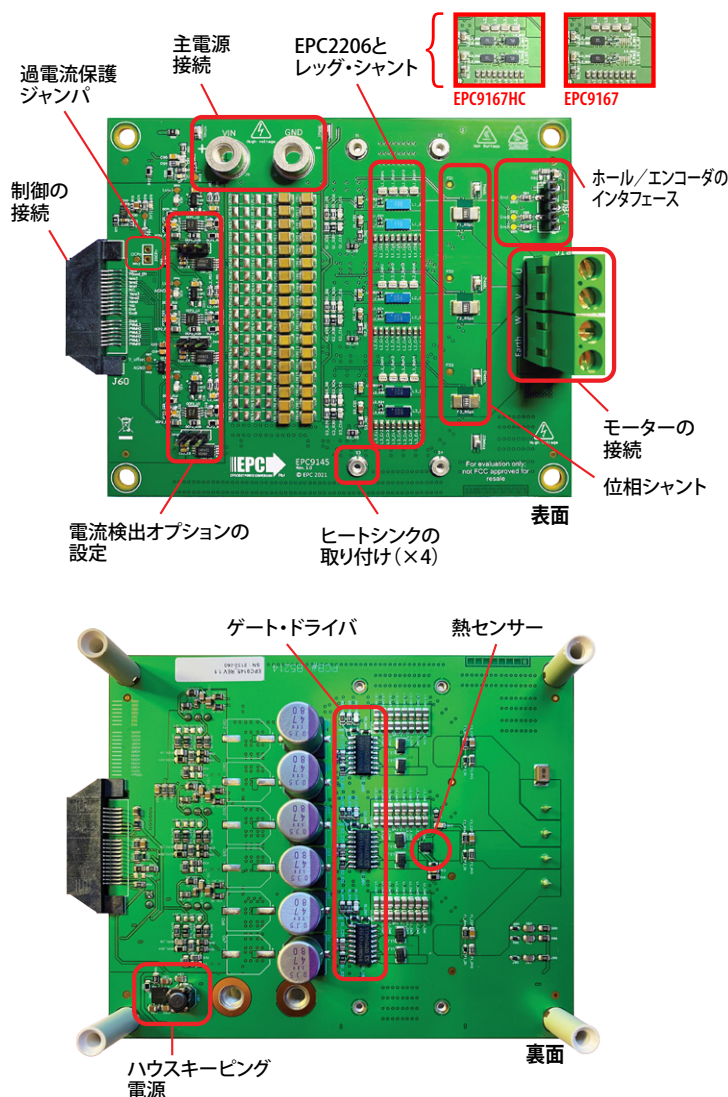


図1. 主要な部分を強調した基板EPC9167とEPC9167HCの全体写真。

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。基板上にジャンパ J_{OCpn} を挿入することによって、過電流の期間中、PWM信号が局所的に自動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。

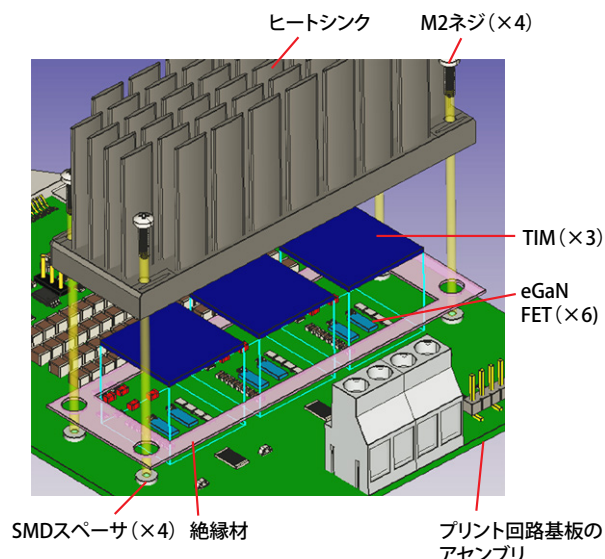


図2. ヒートシンクを基板に取り付けるための詳細。

直流リンク・コンデンサは、バッテリー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安定化させます。スイッチング周波数が高いと、必要な容量値を小さく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、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、EPC9167をカスタマイズすることができます。

EPC9167には、図2に示す自然対流冷却専用のヒートシンクが実装されています。

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。この基板に使われるTIMは、台湾のT-グローバルテクノロジーの導電率6.2 W/m・Kの型番TG-A6200×0.5 mmです。

モーター駆動用インバータ向けeGaN FETの選択

EPC9167は、6個のEPC2065 (eGaN FET) で構成された3相インバータです。EPC9167HCは、各スイッチに2個並列接続した12個のEPC2065を使っています。等価オン抵抗 $R_{DS(ON)}$ は半分にになります。

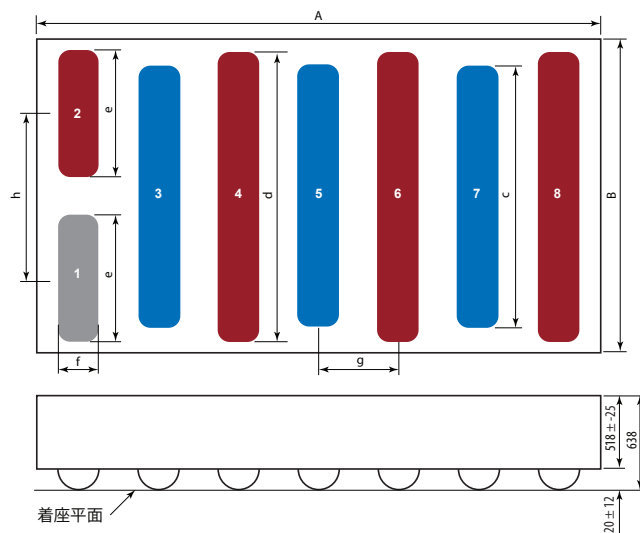
窒化ガリウム・デバイス技術は、電子移動度が非常に高く、温度係数が小さくなっています。eGaN FETのEPC2065は、ドレイン・ソース間のオン抵抗 $R_{DS(ON)}$ の標準値が2.7 m Ω (25°C) と小さくなっています。

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と小さいので、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。通常、従来の電動自転車の設計では、電磁放射規則に準拠するために、LCフィルタがバッテリーとインバータの間に挿入されています。EPC9167を100 kHzで使う場合は、入力フィルタを取り外すことができます。

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個または12個のEPC2065を実装して、高い電力密度を得ることができます。EPC2065の外形が図3です。

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 $V_{DS}=80$ V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社の3個のゲート・ドライバSTDRIVEG600によって構成されています [2]。ゲート抵抗は、 di/dt と dv/dt を設定することに役立ち、EPC9167では10 Ω に設定されて、スイッチング・ノードでオーバーシュートすることなく、減衰過渡電圧 (9 V/ns) が得られます。



ディメンジョン	マイクロメーター		
	最小	標準	最大
A	3470	3500	3530
B	1920	1950	1980
c		1625	
d		1800	
e		775	
f		250	
g		500	
h		1025	

図3. はんだバーを備えたパッシブバートしたチップ形式のEPC2065のeGaNパッケージ: 左上) 表面図、左下) CSPの側面図。

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 20 mV/A で増幅され、 1.65 V のオフセット電圧が追加されます。アンプの帯域幅は 400 kHz で、高いスイッチング周波数での正確なモーター制御動作に適しています。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)は、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にも送信されます。中央揃えの対称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、 50 A 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、 $3.6\text{ }\mu\text{s}$ 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。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、それに応じ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、EPC9167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 50 A_{peak} に制限できます。

直流供給電圧と各位相の電圧は、 40.5 mV/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。

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

温度センサーは、EPC2065のパッケージ上部の温度を測定する赤外線カメラを使って特性を測定しています。この関係を図5に示します。

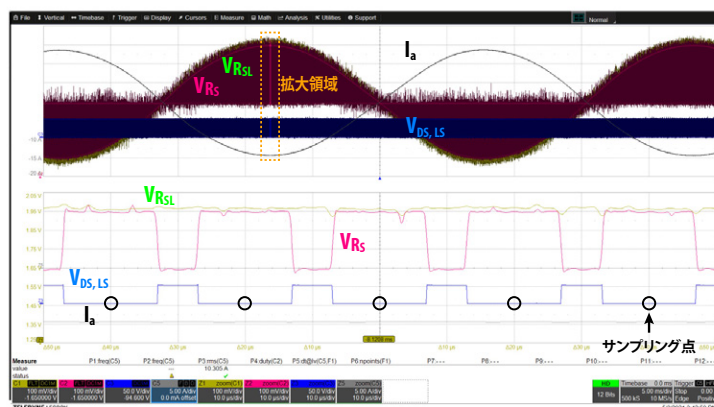


図4. 位相電流、レッグ電流の検出信号。スイッチング周期中の実験波形と拡大図。アナログ-デジタル変換信号のサンプリング点の位置が強調表示されています。 $I_a = 5\text{ A/div}$, $V_{DS,LS} = 50\text{ V/div}$, $V_{RS} = V_{RSL} = 100\text{ mV/div}$, $t = 5\text{ ms/div}$, 拡大図の $t = 10\text{ }\mu\text{s/div}$ 。

温度センサーの特性

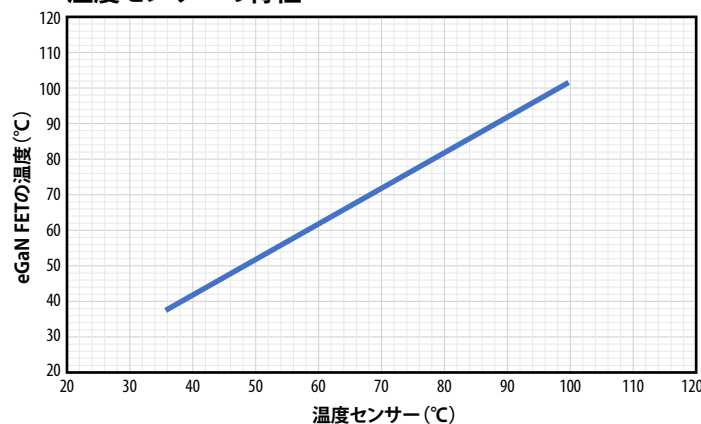


図5. eGaN FETのパッケージ温度とプリント回路基板の裏面に配置された温度センサーの温度。ヒートシンクなしで、自然対流下で動作したとき。

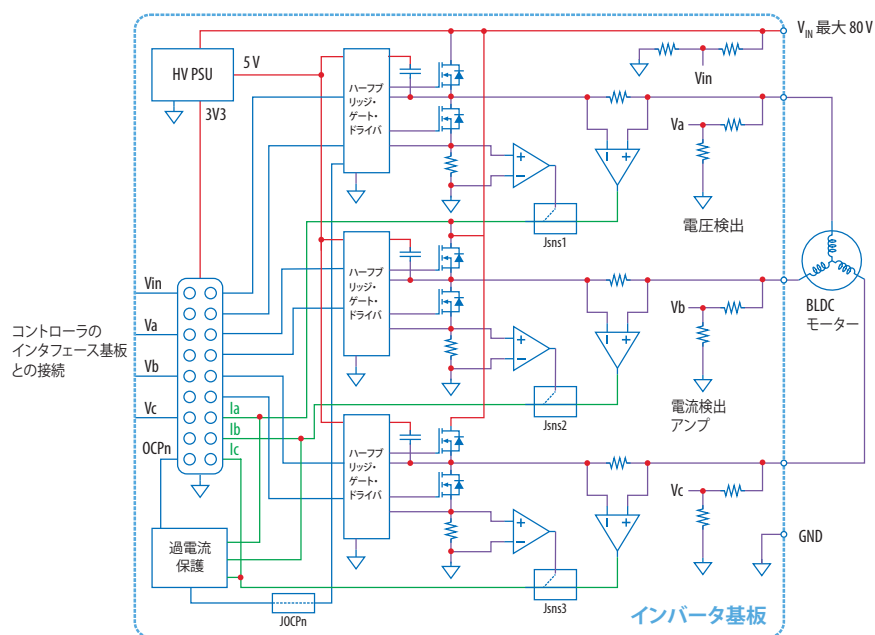


図6. EPC9167の回路ブロック図。

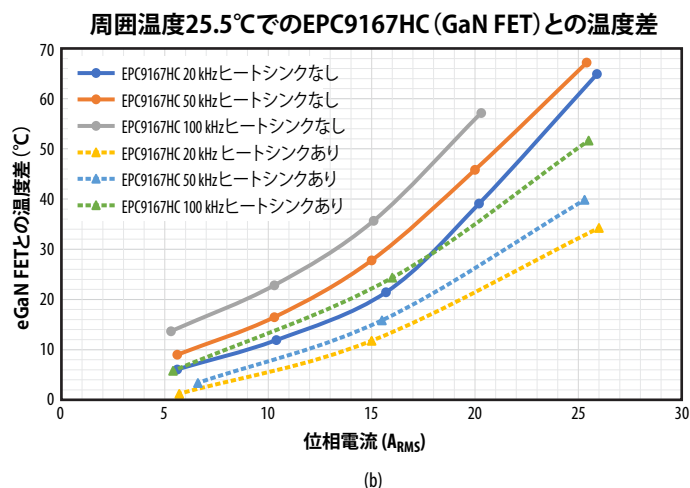
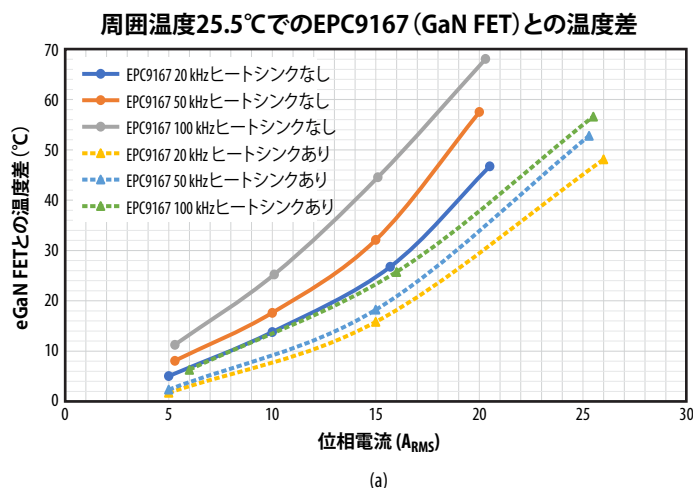


図7. EPC9167(a)とEPC9167HC(b)のGa N FETの温度(*)は、周囲温度 [25.5°C] に対して上昇します。さまざまなPWM周波数で測定。(*) ヒートシンクありの場合、接合部温度は直接測定されていません。ヒートシンク付きの示された温度差は、ヒートシンクの台座で最も高温の点です。

実験的検証

実験的検証のため、電源基板EPC9167は、3相BLDCモーター駆動用インバータ向けに構成しました。これが最適化されたメイン・モードだからです。

図6は、EPC9167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。EPC9167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 NEMA34 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ーフェース基板: 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周波数は、50 kHzに設定され、デッドタイムは100 nsです。

図7のグラフは、さまざまなPWM周波数において、eGa N FETの温度と周囲温度との差と、電流能力の関係を示しています。この実線は、ヒートシンクなしで、自然対流で動作したときを表しています；破線は、自然対流でヒートシンクを使ったときです。実験中に使われた電動自転車用モーターの損傷を避けるために、電流は各位相で27 A_{RMS}以下に保たれています。一般的に、EPC9167HCはEPC9167よりも低い温度で動作するので、ハイエンドの電動自転車ソリューションに適しています。EPC9167は、従来の電動自転車ソリューションに適しています。

インバータの入力電圧のリップルは、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、入力電圧と電流リッ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。

結論

EPC9167は、48 V 入力、1 kW出力で、eGaN FETのEPC2065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30 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, [Online]. Available: https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/schematics/epc9167_schematic.pdf
- [2] STMicroelectronics, “STDRIVEG600 datasheet,” [Online]. Available: <https://www.st.com/en/power-management/stdriveg600.html>
- [3] Teknic. [Online]. Available: <https://teknic.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 EPC9167 Quick Start Guide,” [Online]. Available: https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/guides/epc9167_qsg.pdf
- [6] EFFICIENT POWER CONVERSION, “EPC2065 - Enhancement Mode Power Transistor,” [Online]. Available: https://epc-co.com/epc/Portals/0/epc/documents/datasheets/EPC2065_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
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