

リファレンスデザイン:5kW 絶縁双方向 DC-DC コンバーター

SiC MOSFET 採用により電源システムの効率を向上



このリファレンスデザインは、大電力変換用途において注目されている方式の1つであるデュアルアクティブブリッジ (DAB) 方式を採用した絶縁双方向 DC-DC コンバーターです。SiC MOSFET を採用することで大電力変換と高効率化の両立が可能になります。このリファレンスデザインの利用により、電気自動車 (EV) の充電システムや太陽光発電用インバーターなどのシステム開発を迅速かつ簡単に進めることが可能です。

環境とエネルギーに関する問題解決は、世界的な重要課題であることは言うまでもありません。省エネルギーが注目されているなか電力需要は逆に増加しており、高効率で小型の電力変換システムのニーズが急速に高まっています。

身近な例として近年、温暖化ガス排出の削減に向けガソリン車を規制する動きが世界各地で相次いでいます。この動きは先進国に加え中国、インドといった新興国にも起きており、すでに世界規模の流れになっています。この流れに対応するには、電気自動車 (EV) の普及が 1 つの鍵になりますが、充電インフラの整備が大きな課題になっています。

また、太陽光発電システムの需要も同様に、世界的に高まっています。太陽光発電システムは発電した電力を無駄なく電力網に供給する他、蓄電池を充電するなど、高効率な電力変換回路を中心に構成されています。

いずれもインフラゆえに国情、政策、資金、技術開発、規格標準化などが複雑に関係しますが、特に新興国においては必要な性能を持つ高効率な EV 充電システムや太陽光発電システムを短期間で開発するのは、保有技術の面から困難なことが予想されます。そのため、開発から製品化までをスムーズかつ迅速に推進可能にするサポートや情報の提供が強く求められています。

この例に関わらず、特に産業分野では共通化や標準化が進む中、能率のよい開発設計アプローチとしてリファレンスデザインを利用するケースが増えています。デバイスメーカーが持つ多くのアプリケーション情報と、デバイス選択と回路の最適解をベースにした汎用性の高いリファレンスデザインが今注目されています。

リファレンスデザインのご紹介

東芝デバイス&ストレージ株式会社では、機器設計を迅速に進めるための参考データとして数々のリファレンスデザインを提供しています。リファレンスデザインは、ウェブサイトのリファレンスデザインセンターから一式をダウンロードすることができます。末尾の「関連情報」に、ここで紹介するリファレンスデザインおよび関連情報へのリンクなどをまとめてありますので、是非ご利用ください。なお、リファレンスデザインには利用規約がありますので、併せて確認をお願いします。

今回は、EV 用充電ステーションなどの大電力変換機器や太陽光発電用のインバーターの構成に利用できる、「5kW 絶縁双方向 DC-DC コンバーター」のリファレンスデザインを紹介します。

●5kW 絶縁双方向 DC-DC コンバーター (リファレンスデザイン:RD167)

このリファレンスデザインは、大電力変換用途において注目されている方式の 1 つである、DAB (Dual Active Bridge) 方式を採用した絶縁双方向 DC-DC コンバーターです。DBA 方式は左右双方にフルブリッジを持ち、左右のブリッジ回路の位相差を調節することで、電力伝送の方向と電力伝送量を制御します。このリファレンスデザインには、以下の特長があります。

①DAB (Dual Active Bridge) 方式による双方向大電力変換

このリファレンスデザインのような 5kW の双方向 DC-DC コンバーターを構成するための電源トポロジーはいくつかありますが、このリファレンスデザインでは効率を重視して DAB 方式を採用しました。DAB 方式は、高圧側、低圧側ともにフルブリッジ構成であり、ハーフブリッジ方式と比較して大電力に対応できます。また、位相シフトによる電力伝達のためソフトスイッチングが可能で、高効率な DC-DC コンバーターを実現できます。スイッチング素子として IGBT を使用した場合はスイッチング損失が大きいため大きな効率改善は望めませんが、SiC MOSFET を採用することで大電力変換と高効率化の両立が可能になります。

②高圧側に SiC MOSFET を採用し高い電力変換効率を実現

三相 AC400V 入力対応 PFC の出力を入力電源とする想定では、高圧側入力 DC750V 対応が必要になります。この場合、必要な素子耐圧は 1000V であることから、一般的には IGBT を選択することになります。しかし、IGBT は MOSFET と比較して構造および特性的にスイッチング損失が大きく、高効率化には限界があります。対して SiC MOSFET はスイッチングが高速なことから IGBT よりスイッチング損失が小さく、より高いスイッチング周波数で動作させることが可能になります。通常、スイッチング周波数を高くするとスイッチング損失は増加する傾向にありますが、SiC MOSFET を使用することで総合的な損失を IGBT より低く抑えることが可能です。また、スイッチング周波数を高くできることで小型のインダクターを使用できるようになり、電源装置としての小型化が期待できます。

③低圧側 MOSFET (TK49N65W5)、ゲートドライバー (TLP5214A) を含めたトータルソリューション

このリファレンスデザインでは、低圧側は 400V 入出力を想定しているため Si MOSFET を使用しています。Si MOSFET には、寄生ダイオードの高速化と、スーパージャンクション構造によりスイッチング損失を低減した TK49N65W5 を採用し、低圧側においても高効率化を図っています。ゲートドライバー IC には、1200V 耐圧 SiC MOSFET のスイッチング時ゲート充放電電流を十分にドライブ可能な 4A のシンク・ソース電流能力を備えた TLP5214A を採用しています。TLP5214A は、過電流保護機能や UVLO 機能を備えているので、異常時の回路保護も提供しています。

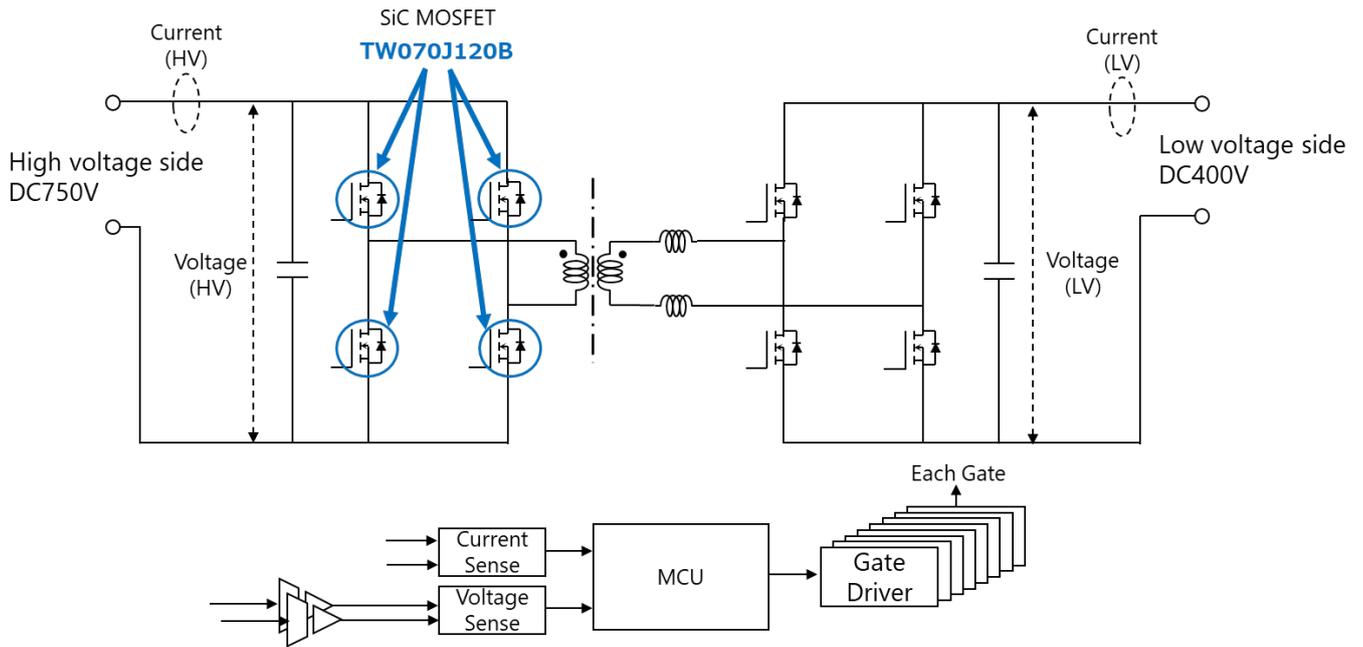


図 1:「5kW 絶縁双方向 DC-DC コンバーター」リファレンスデザインの機能ブロック図

また、主な仕様は以下の通りです。

高圧側電圧: DC 750V (入力時電圧範囲: 732V~768V)

低圧側電圧: DC 400V (出力時電圧範囲: 396V~404V)

電力定格: 5kW

電力変換効率: 昇圧 100%負荷時 97%以上、降圧 100%負荷 97%以上

スイッチング周波数: 50kHz

制御方式: 一定電圧出力制御

絶縁耐圧: 2500V (主回路-制御回路)

保護(S/W): 高圧側過電圧保護、低圧側過電圧保護

このリファレンス回路の非常に高い変換効率は、DAB 双方向 DC-DC 変換方式の採用とともに、IGBT に比べて高速なスイッチング特性を持つ SiC MOSFET をスイッチング素子として採用したことにより達成されています。SiC パワーデバイス、電力変換回路において非常に高いポテンシャルを持っていることから、関連アプリケーションでの採用が広がっています。

アプリケーションの例

このリファレンスデザインを利用したアプリケーション 2 例を紹介します。

① 電気自動車 (EV) 用充電システムの例

高効率な「3 相 AC400V 入力対応 PFC 電源」リファレンスデザインと「5kW 絶縁双方向 DC-DC コンバーター」リファレンスデザインとの組み合わせにより、双方向充電を実現するシステムイメージです。2 つのリファレンスデザインを併せて利用することで、システム開発を迅速かつ簡単に進めることが可能です。

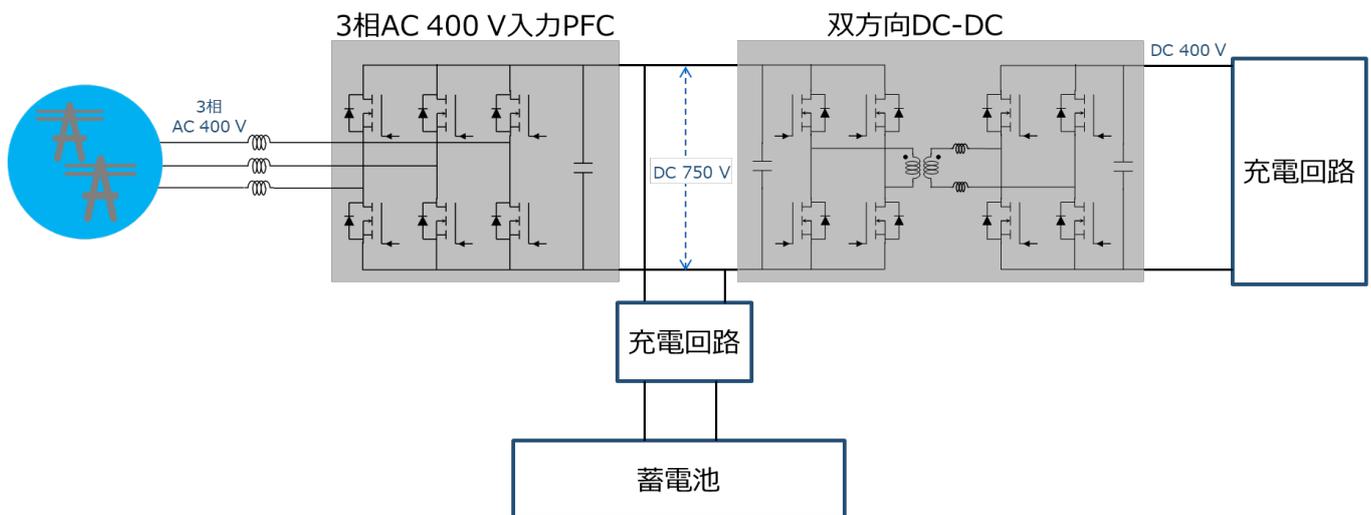


図 2:「5kW 絶縁双方向 DC-DC コンバーター」リファレンスデザインを利用した EV 充電システムのイメージ

EV 普及のためには、走行距離を延ばすことと充電速度を速めることがポイントになると言われています。

走行距離を延ばすためには、バッテリー容量を大きくするアプローチがありますが、車に搭載できるバッテリーの容量には、サイズの制限から限界があります。したがって、適当な容量のバッテリーを搭載し充電頻度を高めることで走行距離を延ばすことが考えられます。充電頻度が高くなると、1 回あたりの充電時間の短縮が求められ、充電時間を短くするには高電圧による大電力化が必要になります。

その対応として、高速充電器のインフラ整備が進められており、EV 充電スタンドの電源として 3 相 AC 400V を活用している例があります。三相 AC400V を EV チャージャーの入力源とすることで大電力化が可能になります。しかしながら、設置台数が多くなると全体の損失は無視できなくなるため、高効率な電力変換が必須になります。

3相 AC400V を入力電源として使用するには、AC-DC 変換のための PFC 電源、PFC の DC 出力から EV バッテリー充電回路に低損失に電力を供給する絶縁型高効率 DC-DC コンバーターが必要になります。さらに、EV バッテリーの EV 以外への電力供給源としての活用や、外部バッテリーと組み合わせたシステム構築を想定した場合、双方向 DC-DC コンバーターが有用です。

このアプリケーション例は、3相 AC400V からの大電力を効率よく AC-DC 変換する PFC 電源と、高効率かつ双方向動作が可能な絶縁型 DC-DC コンバーターの組み合わせによって、低損失な高速 EV 充電スタンド普及の促進を意図したものです。

② 太陽光発電用インバーターの例

太陽光発電用インバーター（以下、PV インバーター）は、太陽電池パネルからの DC 電圧を調整して、インバーターや蓄電池充電回路に送電するために、損失の少ない高効率の双方向 DC-DC コンバーターが必要です。

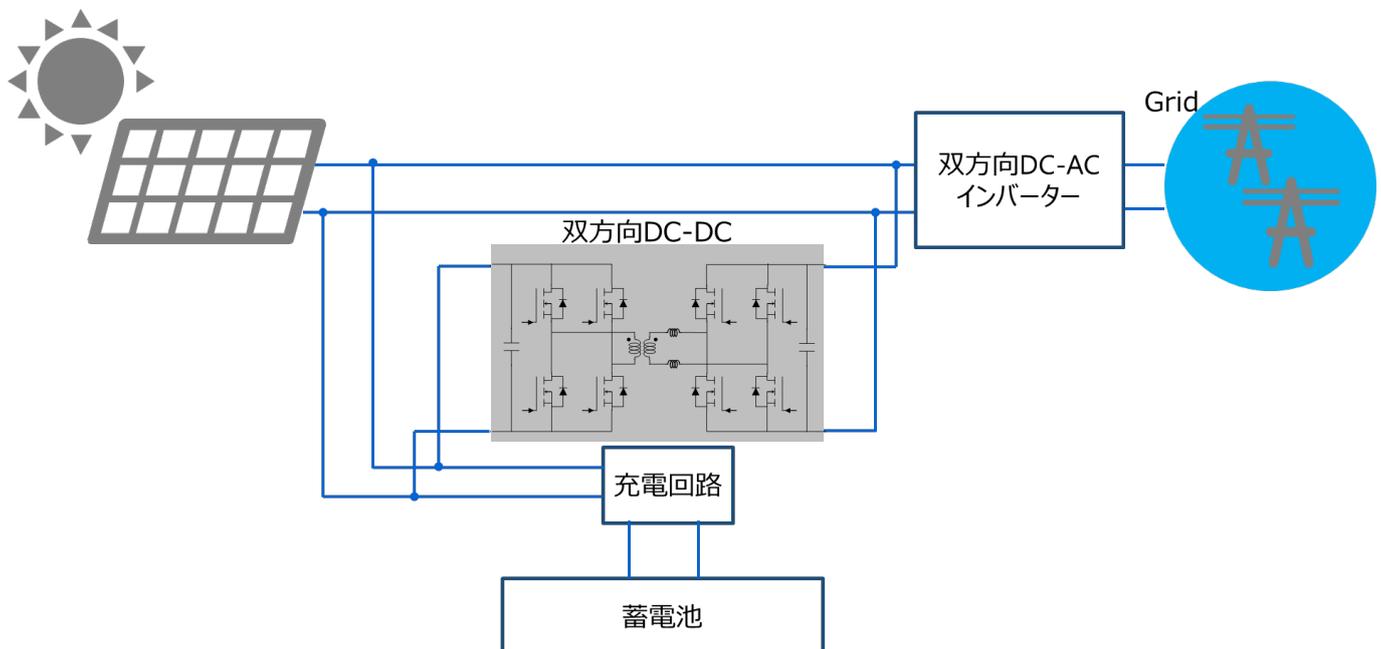


図 3:「5kW 絶縁双方向 DC-DC コンバーター」リファレンスデザインを利用した PV インバーターシステムイメージ

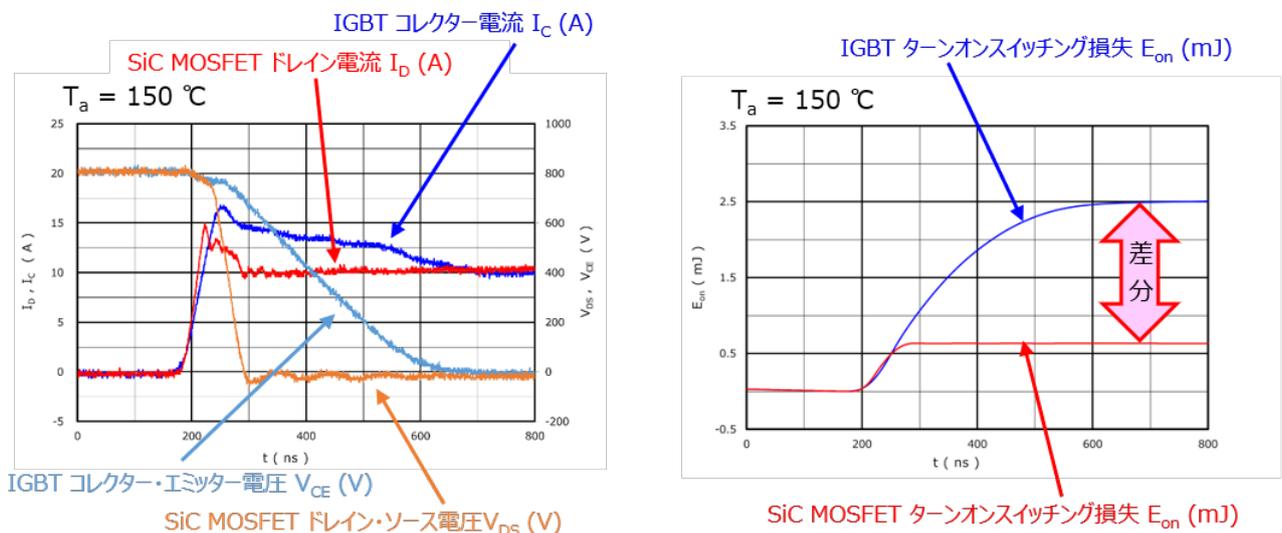
SiC MOSFET のシステムへの貢献

電力変換システムの効率向上、つまり損失の低減には、使用するパワーデバイスの性能が大きく影響します。そのため、従来の Si (シリコン)に加えて、SiC (炭化ケイ素) や GaN (窒化ガリウム) などの半導体材料を使用したパワーデバイスが増えてきています。

今回紹介したリファレンスデザインでは、上述の通り SiC MOSFET の採用により変換効率の向上を図っています。以下に、大電力変換アプリケーションでは現在の主流である IGBT (絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ) と SiC MOSFET の損失比較例、SiC MOSFET の仕様と特徴を示します。

●SiC MOSFET と IGBT の損失比較

スイッチングトランジスタにおける損失は、スイッチング損失、オン抵抗による導通損失、内部ダイオード順方向電圧の損失の総和となります。中でもスイッチング損失は全体の 9 割近くを占めます。図 3 は、SiC MOSFET と IGBT のターンオン時のスイッチング波形と損失 E_{on} の比較例です。比較に使用した SiC MOSFET は、今回のリファレンス回路に採用した東芝製 [TW070J120B](#)、IGBT は他社製高速スイッチングタイプを使用しています。



●SiC MOSFET 試験条件
 $V_{DB}=800V$ 、 $I_D=10A$ 、 $T_a=150^\circ C$ 、 $V_{GS}=20V/-5V$ 、誘電負荷： $L=1mH$ 、外付けゲート抵抗 $R_G=150\Omega$
 ソース・ドレイン間ダイオードを誘導負荷と並列にフリーホイーリングダイオード (FWD) として使用

●IGBT 試験条件
 $V_{CC}=800V$ 、 $I_C=10A$ 、 $T_a=150^\circ C$ 、 $V_{GE}=20V/-5V$ 、誘電負荷： $L=1mH$ 、外付けゲート抵抗 $R_G=47\Omega$
 エミッタ・コレクター間ダイオードを誘導負荷と並列に FWD として使用

※ターンオン時の I_D 、 I_C の傾き $dI_D(I_C)/dt$ を合わせるために設定した試験条件

図 3: SiC MOSFET と IGBT のターンオン時のスイッチング波形と損失 E_{on} の比較例

この例は、IGBT のターンオン損失が 2.5mJ、SiC MOSFET は 0.6mJ であることから、スイッチングトランジスタを IGBT から SiC MOSFET に置き換えた場合にターンオン損失を 76%低減可能であることを示しています。この損失の差は、スイッチング波形図の VDS と VCE のスイッチング特性 (速度) の差が主な要因になっています。SiC MOSFET

は速やかに完全にターンオンしそれに従った ID が流れていますが、IGBT は完全なターンオンに時間を要し、その期間が損失となります。

また、図 5 はシミュレーションによる SiC MOSFET と IGBT のターンオンおよびターンオフのスイッチング損失、オン抵抗による導通損失、内部ダイオード順方向電圧による損失の総和の比較例です。条件は、VCC=400V、IO=7.0Arms、力率=1、3 相変調、Tj=150°Cです。この結果からは、SiC MOSFET は IGBT と比較して約 28W の損失を低減可能で、機器の効率向上に寄与することがわかります。

このように、汎用的な既存の電力変換アプリケーションにおいても、IGBT を SiC MOSFET に置き換えることで大幅な損失低減が可能です。損失の低減により、同じ電力を扱うなら回路の小型化が可能になります。また、同じサイズであれば、より多くの電力を扱うことが可能になります。

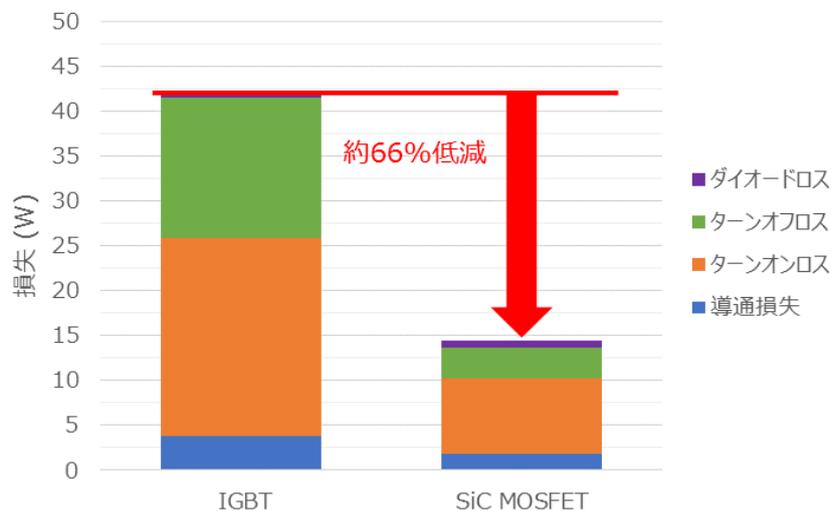
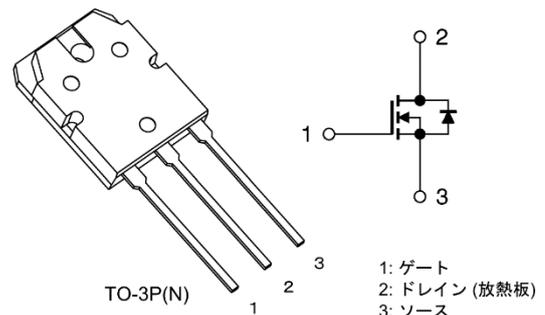


図 5: SiC MOSFET と IGBT の各損失と総和の比較例

● SiC MOSFET: [TW070J120B](#)

今回のリファレンス回路の高圧側に使用した TW070J120B は N チャネルの SiC MOSFET で、弊社第 2 世代チップデザインの SiC ショットキーバリアダイオード (SiC SBD) 内蔵タイプです。以下に主な仕様を示します。

- SiC ショットキーバリアダイオードを内蔵
- 低い内蔵ダイオード順方向電圧: VDSF = -1.35V (標準)
- 高耐圧: VDSS = 1200V
- 広いゲート・ソース間電圧: VGSS = +25V ~ -10V
- 低オン抵抗: RDS(ON) = 70mΩ (標準)
- 高いゲートしきい値: Vth = 4.2V ~ 5.8V



SiC ショットキーバリアダイオードを内蔵したことで、MOSFET のボディ (寄生) ダイオードより低い VDSF を実現し、ダイオードの導通損失が低減します。また、IFSM が高いダイオードを採用しているため、サージ電流耐量に優れています。信頼性の観点からは、ダイオード内蔵により部品カウントが 1 個となることで、構成回路の故障率を下げるることができます。

ゲート・ソース間電圧の定格 VGSS は、競合品に比べ範囲が広がっています。VGSS の許容範囲が広いことで、設計が容易になります。

また、ゲートしきい値電圧の規格は競合品より高い値で規定されています。これにより、ゲート電圧の変動やノイズに対して誤動作しにくくなっています。

このような特長から TW070J120B は、低損失で強靭さを持ち合わせた設計しやすい SiC MOSFET になっています。

●SiC MOSFET のゲート駆動

SiC MOSFET のゲート駆動は、SiC の物性や高速スイッチング特性を考慮した方法になります。以下に、TW070J120B を例にしたポイントをまとめました。詳細につきましては、関連のアプリケーションノートなどを参照願います。

<SiC MOSFET ゲート制御のポイント>

- ①ゲート・ソース電圧は絶対最大定格-10V~25V を厳守する。
- ②ターンオン時のゲート電圧を 18V~20V に設定する。
- ③ターンオフ時のゲート電圧を 0~-5V に設定する。
- ④ゲート・ソース間容量 (CGS) をゲート電荷で十分に充電する必要がある。

ゲート電圧を印加しターンオンさせるためには、ゲート・ソース間容量をゲート電荷で充電する必要があります。VGS が 0~20V 時のゲート電荷は標準で 70nC (VDD=800V、VGS=20V、ID=36A) です。使用するスイッチング周波数で、この電荷を十分に充電できる電流を流す必要があります。

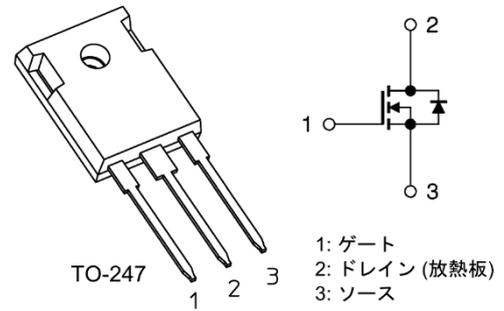
なお、先に紹介したリファレンスデザインでは、ゲート駆動回路において標準的な条件が設定されています。実際の動作を確認し評価を行い最適化が可能です。

●スーパージャンクション MOSFET: [TK49N65W5](#)

今回のリファレンス回路の低圧側には、N チャネル Si MOSFET の TK49N65W5 を使用しています。TK49N65W5 はスーパージャンクション構造 DTMOS の採用によりオン抵抗が低く、加えて逆回復時間が高速であることから、導通

損失とスイッチング損失の両方を低く抑えることが可能なタイプです。また、ゲートスイッチングスピードが最適化されていることも特長です。以下に主な仕様を示します。

- 低いオン抵抗 $R_{DS(ON)}$: 0.051Ω (標準)
- 速い逆回復時間 t_{rr} : 145ns (標準)
- ドレイン・ソース電圧 V_{DSS} : 650V (定格)
- ゲート・ソース間電圧 V_{GSS} : $\pm 30\text{V}$ (定格)
- ドレイン電流 (DC) I_D : 49.2A (定格)
- ドレイン電流 (パルス) I_{DP} : 196A (定格)



まとめ

近年、製品市場投入までの時間短縮要求は厳しさを増しており、機器の開発設計に携わる技術者には短時間で極力手戻りのない設計が求められています。その解決策の1つとして、デバイスメーカーが提供するリファレンスデザインを利用するケースが増えています。

今回紹介した「5kW 絶縁双方向 DC-DC コンバーター」のリファレンスデザインは、電力変換アプリケーションの高効率化と小型化を意図した提案です。高効率化のための損失低減には、降圧側パワースイッチを従来の IGBT から SiC MOSFET に置き換えたことがポイントになっています。また、低圧側も低オン抵抗で高速な逆回復時間を備えたスーパージャンクション MOSFET の採用も損失低減に貢献しています。

SiC パワーデバイスが、大電力アプリケーションにおいて非常に有用な選択肢であることはすでに広く知られていますが、その優れた特性を活用するためには、SiC パワーデバイスの特徴を理解する必要があります。この点において、リファレンスデザインは標準的な条件を提供しており、開発設計をスムーズかつ迅速に進める大きな手助けになります。

このリファレンスデザインは、低炭素社会の実現に向けた EV 普及の鍵となる充電ステーションや太陽光発電システムのようなインフラアプリケーションへの利用が可能です。特に新興国での開発には、このようなリファレンスデザインは大いに役立つものと考えられます。

弊社では今後、さらにリファレンスデザインの提供を増やす方針です。また、大電力変換アプリケーション向けには SiC パワーデバイスを取り入れたデザインを積極的に展開していきます。同時に SiC パワーデバイスの新世代品の開発も進めており、近々現状の第2世代に加えて第3世代品の発表も予定しています。

関連情報

- [5kW 絶縁双方向 DC-DC コンバーター \(リファレンスデザイン: RD167\)](#)
- [3相 AC400V 入力対応 PFC 電源 \(リファレンスデザイン: RD044\)](#)
- [リファレンスデザインセンター](#)
- [SiC MOSFET 製品ページ](#)
- [SiC MOSFET: TW070J120B](#)
- [スーパージャンクション MOSFET: TK49N65W5](#)

東芝デバイス&ストレージ株式会社

◇ 当社の製品・ソリューションに関するお問い合わせ

<https://toshiba.semicon-storage.com/jp/contact.html>



製品取り扱い上のお願い

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。

本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いいたします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器（ヘルスケア除く）、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、発電関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口まで、または当社 Web サイトのお問い合わせフォームからお問い合わせください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- 本製品には GaAs（ガリウムヒ素）が使われているものがあります。その粉末や蒸気等は人体に対し有害ですので、破壊、切断、粉碎や化学的な分解はしないでください。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品の RoHS 適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。