

Full SiC MOSFET
10kW 絶縁双方向 DC-DC コンバーター
デザインガイド

RD264-DGUIDE-01

東芝デバイス&ストレージ株式会社

目次

1. はじめに	3
2. 主な使用部品	4
2.1 SiC MOSFET TW060N120C	4
2.2 SiC MOSFET TW048N65C	5
2.3 ゲートドライバーカプラー TLP5214A	6
2.4 光結合型アイソレーションアンプ TLP7920	7
3. 回路設計	8
3.1. 高圧側回路設計	8
3.2. トランス、インダクター選定	10
3.3. 低圧側回路設計	11

1. はじめに

本デザインガイドは Full SiC MOSFET 10kW 絶縁双方向 DC-DC コンバーター (以下、本デザイン) の各種回路の設計方法を記載したドキュメントです。

本デザインは最大 10kW の電力供給が可能な双方向 DC-DC コンバーターであり、高圧側 (750V) に電力を供給し低圧側 (400V) に電力を出力する、もしくは低圧側 (400V) に電力を供給し高圧側 (750V) に電力を出力します。本電源では効率を重視して DAB (Dual Active Bridge) 方式を採用しています。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ができます。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。電気自動車 (xEV) 用充電システムや太陽光発電用インバーターなど各種産業機器への応用が可能です。

高圧側は 750V 入出力を想定しており、スイッチングに必要な素子耐圧は 1000V 以上となり一般的には IGBT が選択されますが、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。本デザインでは 1200V SiC MOSFET である [TW060N120C](#) を使用することで大電力変換と高効率化の両立を実現しています。また低圧側は 400V 入出力を想定しており、650V SiC MOSFET である [TW048N65C](#) を使用し、低圧側でも高効率化を図っています。

ゲートドライバーには、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、過電流保護機能や UVLO 機能も搭載したスマートゲートドライバーカプラー [TLP5214A](#) を使用しています。また絶縁が必要となる電圧センサー回路には、リニアリティー精度が高く、コモンモード過渡特性も高い光結合型アイソレーションアンプ [TLP7920](#) を使用しています。

2. 主な使用部品

この章では本デザインに使用している部品について説明します。

2.1 SiC MOSFET TW060N120C

高圧側のスイッチング素子に 1200V 耐圧 SiC MOSFET [TW060N120C](#) を使用しています。TW060N120C の主な特長は以下のとおりです。

- 第3世代チップデザイン (SiCショットキーバリアダイオード内蔵)
- 順方向電圧 (ダイオード) が低い: $V_{DSF} = -1.35V$ (標準)
- 高耐圧: $V_{DSS} = 1200V$
- オン抵抗が低い: $R_{DS(ON)} = 60m\Omega$ (標準)
- しきい値が高く誤動作しにくい: $V_{th} = 3.0 \sim 5.0V$ ($V_{DS} = 10V, I_D = 4.2mA$)
- 推奨駆動電圧: $V_{GS_{on}} = 18V, V_{GS_{off}} = 0V$
- 取り扱いが簡単なエンハンスメントタイプ

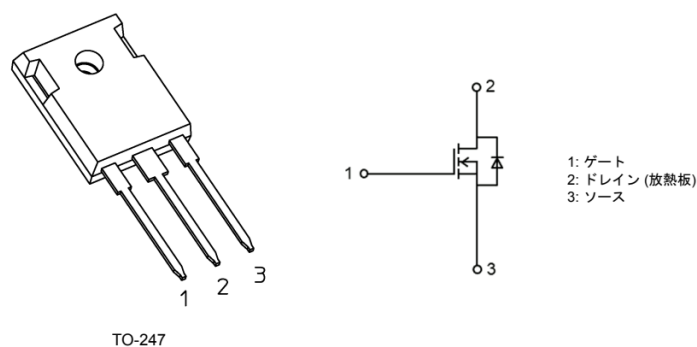


図 2.1 TW060N120C の外観と端子配置図

2.2 SiC MOSFET TW048N65C

低圧側のスイッチング素子に 650V 耐圧 SiC MOSFET [TW048N65C](#) を使用しています。TW048N65C の主な特長は以下のとおりです。

- 第3世代チップデザイン (SiCショットキーバリアダイオード内蔵)
- 順方向電圧 (ダイオード) が低い: $V_{DSF} = -1.35V$ (標準)
- 高耐圧: $V_{DSS} = 650V$
- オン抵抗が低い: $R_{DS(ON)} = 48m\Omega$ (標準)
- しきい値が高く誤動作しにくい: $V_{th} = 3.0 \sim 5.0V$ ($V_{DS} = 10V, I_D = 1.6mA$)
- 推奨駆動電圧: $V_{GS_on} = 18V, V_{GS_off} = 0V$
- 取り扱いが簡単なエンハンスメントタイプ

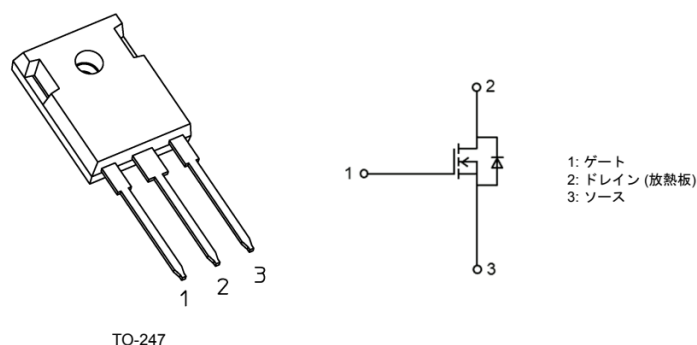


図 2.2 TW048N65C の外観と端子配置図

2.3 ゲートドライバーカプラー TLP5214A

MOSFET の絶縁駆動にゲートドライバーカプラー [TLP5214A](#) を採用しています。

TLP5214A の主な特長は以下のとおりです。

- 出力ピーク電流: $\pm 4.0\text{A}$ (最大)
- 動作温度: $-40 \sim 110^\circ\text{C}$
- 供給電流: 3.8mA (最大)
- 電源電圧: $15\text{V} \sim 30\text{V}$
- スレッシュホールド入力電流: 6mA (最大)
- 伝搬遅延時間 ($t_{\text{pLH}} / t_{\text{pHL}}$): 150ns (最大)
- DESAT 立ち上がり時ブランキング時間: $1.1\mu\text{s}$ (標準)
- コモンモード過渡耐性: $\pm 35\text{kV}/\mu\text{s}$ (最小)
- 絶縁耐圧: 5000Vrms (最小)
- 安全規格

UL 認定品: UL 1577 ファイル No.E67349

cUL 認定品: CSA Component Acceptance Service No. 5A ファイル No.E67349

VDE 認定品: EN 60747-5-5, EN 62368-1

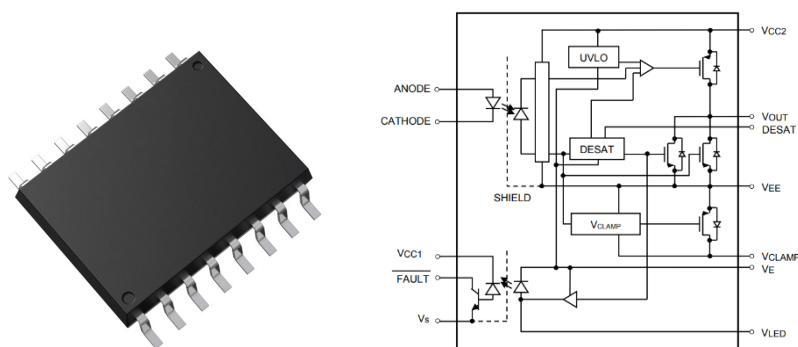


図 2.3 TLP5214A の内部回路構成及びパッケージ外観

2.4 光結合型アイソレーションアンプ TLP7920

入力電圧、出力電圧の絶縁センシングに光結合型アイソレーションアンプ [TLP7920](#) を使用しています。
TLP7920 の主な特長は以下のとおりです。

- 電源電圧(出力側): 3.0 ~ 5.5V
- 出力供給電流: 6.2mA (標準)
- 動作温度範囲: -40 ~ 105°C
- コモンモードトランジェント除去能力: 15kV/μs(最小)
- 安全規格

UL認定品 UL 1577, ファイルNo.E67349

cUL認定品 CSA Component Acceptance Service No.5A ファイルNo.E67349

VDE認定品 EN IEC 60747-5-5

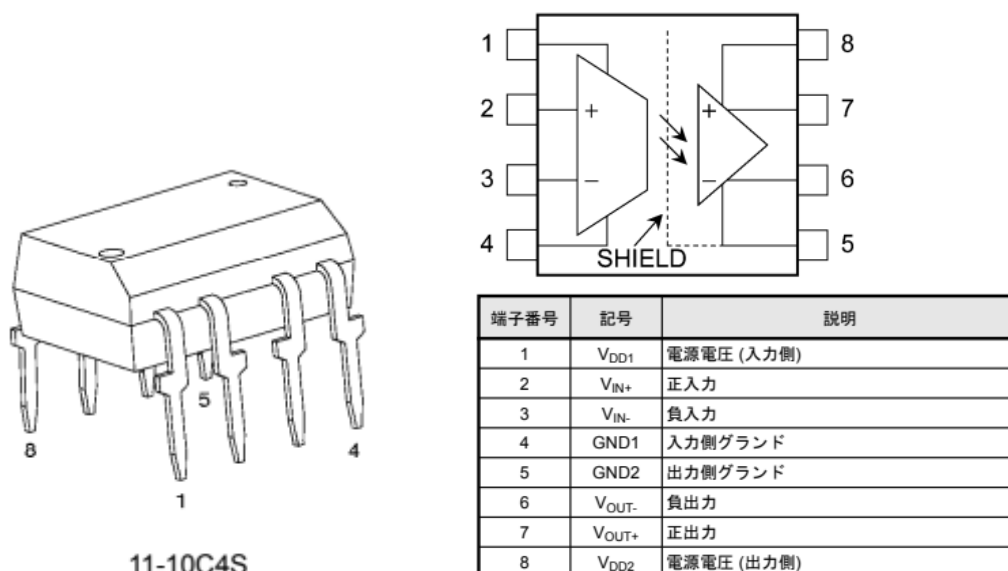


図 2.4 TLP7920 の外観と端子配置図

3. 回路設計

本デザインの回路設計のポイントを記載します。

3.1. 高圧側回路設計

本項では、本デザインの高圧側回路の設計に関して説明します。

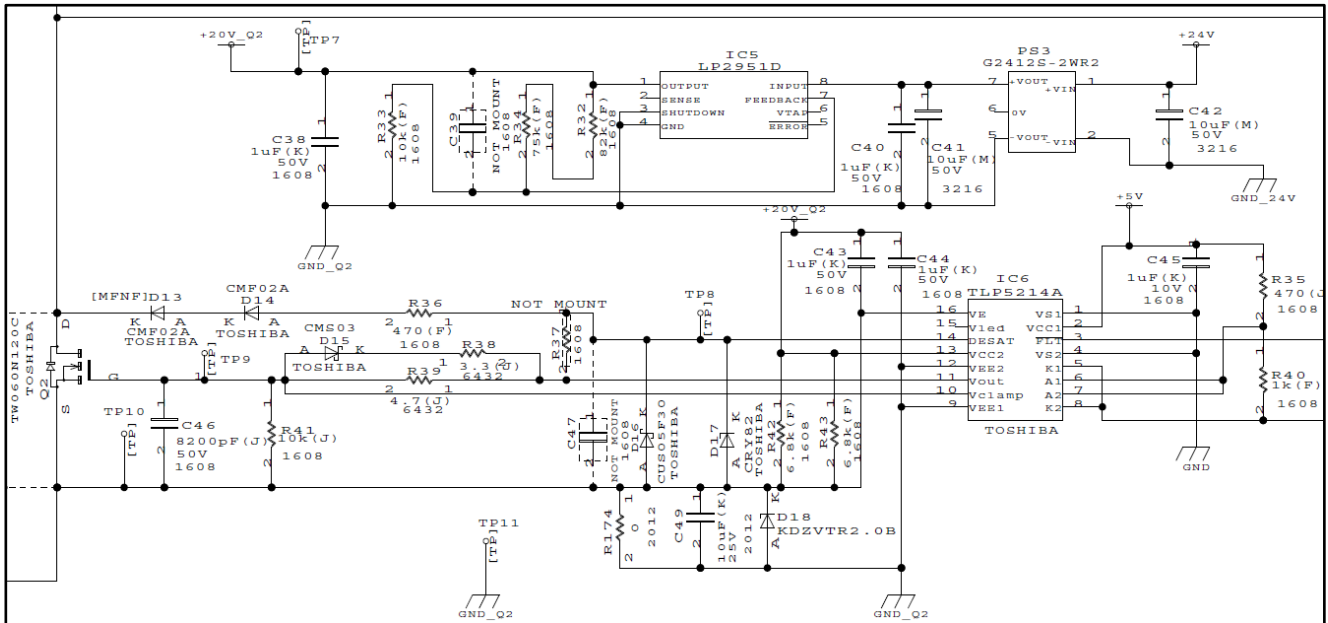


図 3.1 ゲート駆動回路 (高圧側下アーム)

ゲート駆動回路

ゲート駆動回路の代表として、下アーム側 MOSFET Q2 のゲート駆動回路を図 3.1 に示します。ゲート駆動回路の設計は、電源効率と EMI ノイズに影響を与えます。一般的に、電源効率と EMI ノイズはトレードオフの関係にあるため、両者のバランスを取った設計を行う必要があります。本デザインのゲート駆動回路は、MOSFET のスイッチング速度を調整できる回路構成となっています。MOSFET のターンオン時のノイズを低減する必要がある場合は、ゲート直列抵抗 (R39) を大きな値に変更すると、EMI ノイズを低減できる可能性があります。尚、ゲート直列抵抗を大きな値に変更すると、MOSFET のターンオン速度だけでなくターンオフ速度も低下するため、電源効率の悪化が懸念事項となります。この場合の電源効率悪化を低減するには MOSFET のターンオフ速度のみを上げる必要があります。ゲート直列抵抗 (R38) を小さな値に変更することで MOSFET のターンオフ速度のみを上げることができシステムの電源効率悪化を低減できる可能性があります。ゲート直列抵抗を変更する場合は、システムに要求される EMI ノイズや電源効率性能、放熱性能が満足できていることを確認する必要があります。

負バイアス回路

MOSFET のドレイン・ゲート間に寄生するミラー容量によって誤作動する恐れがある場合は負バイアス回路を使用します。図 3.1 は下アーム側に使用したゲート駆動回路になります。下アームが OFF し、上アームが ON した時、中間の電位が急峻に上昇し下アームのドレイン・ゲート間のミラー容量を介して変位電流が発生し、スマートゲートドライバーカプラー (IC6) の VOUT 端子方向へ流れます。この変位電流が回路のゲート抵抗を通過する際に電圧低下が発生し、ゲート電圧が上がるこ

とで下アームの誤オンが発生し、上下アームの短絡が起きることがあります。本デザインではこのような誤オン発生は確認されませんが、実応用時の基板レイアウトや配線の影響で誤オンが発生する際は、対策をする必要があります。

一般に誤オン対策としては、ゲートオフ時の電圧を負電圧にバイアスすることが有効です。本デザインではゲートを負電圧にバイアスしていませんが、ツェナーダイオード (D18) を使用した負バイアス回路を簡単に実現可能な構成としています。D18 と並列に配置した 0Ω抵抗 (R174) を外し、1μF 程度のコンデンサーを配置することで、ゲートオフ時にツェナー電圧分の負バイアスがゲートに印加されます。本デザインでは 2V のツェナーダイオードを使用していますが、実際の動作に応じ適切な素子を選択してください。

出力コンデンサー

高圧側を電源出力として動作させる時の出力コンデンサー (C62~C69) の容量値は、ホールドアップタイム要件に基づいて算出しています。ホールドアップタイム $Thold_{high}$ は、出力コンデンサーの合成容量を $Cout_{high}$ 、出力電圧を $Vout_{high}$ 、出力電圧の下限電圧を $Vout_{high_min}$ 、最大出力電力を $Pout$ とすると、以下の式で算出されます。

$$Thold_{high} = Cout_{high} \times \frac{(Vout_{high}^2 - Vout_{high_min}^2)}{2 \times Pout}$$

初期設定は、 $Cout_{high} = 705\mu\text{F}$ ((470 μF の 2 直列) の 3 並列)、 $Vout_{high} = 750\text{V}$ 、 $Vout_{high_min} = 700\text{V}$ 、 $Pout = 10\text{kW}$ で、ホールドアップタイムは 2.55ms となります。実応用ではシステムに要求されるホールドアップタイムを満足できるよう、出力コンデンサーの容量を調整願います。また、出力リップル仕様を定義した場合は、出力リップル仕様を満たすのに必要な容量を算出し、ホールドアップタイムを満足する容量と比較し、大きい容量値を使用する必要があります。また、コンデンサー選定時には、公差や経年劣化を考慮する必要があります。

3.2. トランス、インダクター選定

トランス選定

高圧側巻線 n_1 、低圧側巻線 n_2 の比 $n = n_1/n_2$ は、高圧側電圧 750 V、低圧側電圧 400V の比 ($750/400=1.875$) と同等になるように設定します。本デザインでは、 $n_1/n_2 = 28/15 (=1.87)$ のトランスを選定しました。

インダクター選定

インダクター (L_1, L_2) の選定方法について説明します。本デザインの最大出力電力は 10kW ですが、拡張性を考え 15kW まで出力可能なインダクターを採用しました。インダクターは低電圧側に配置するため、低圧側を入力 (V_{in})、高圧側を出力 (V_{out}) として、必要なインダクタンス値 (L) の概数は下記項目を用いて計算により求めることができます。

- ・入力電圧 : V_{in} (V)
- ・出力電圧 : V_{out} (V)
- ・出力電力 : P_{out} (W)
- ・巻き線比 : n
- ・スイッチング周波数 : F_c (Hz)
- ・入力側・出力側位相差 (重なり角) : θ (度)

インダクターに印加される電流 I_L は以下の式で表されます。

$$I_L = \frac{2 \times P_{out}}{V_{out}}$$

ここで P_{out} を 15kW、 V_{out} を 750V とすると、インダクター電流 I_L は 40A となります。

この $I_L = 40A$ を位相差 θ の時に出力するためのインダクタンス値 L は、下記式で算出されます。

$$L = \left(V_{in} + V_{out} \times \frac{1}{n} \right) \times \frac{\theta}{180} \times \frac{1}{F_c \times 2} \times \frac{1}{4I_L}$$

ここで、 F_c は 50kHz、 θ は制御性を考え 25 度とすると、上記インダクタンス値 L は 6.96 μ H と算出されるため、本デザインでは 6 μ H のインダクターを選定します。

実際の設計においては、インダクターは直流重畳特性によりインダクタンス値が変動します。直流重畳特性によりインダクタンス値が低下した状態で、上記計算値を確保できる部品を選定してください。

アスがゲートに印加されます。本デザインでは 2V のツェナーダイオードを使用していますが、実際の動作に応じ適切な素子を選択してください。

出力コンデンサー

低圧側を電源出力として動作させた時の出力コンデンサー (C146~C152) の容量値は、ホールドアップタイム要件に基づいて算出しています。ホールドアップタイム $Thold_{low}$ は、出力コンデンサーの合成容量を $Cout_{low}$ 、出力電圧を $Vout_{low}$ 、出力電圧の下限電圧を $Vout_{low_min}$ 、最大出力電力を $Pout$ とすると、以下の式で算出されます。

$$Thold_{low} = Cout_{low} \times \frac{(Vout_{low}^2 - Vout_{low_min}^2)}{2 \times Pout}$$

初期設定は、 $Cout_{low} = 2820\mu\text{F}$ (470 μF の 6 並列)、 $Vout_{low} = 400\text{ V}$ 、 $Vout_{low_min} = 370\text{ V}$ 、 $Pout = 10\text{ kW}$ で、ホールドアップタイムは 3.25ms となります。実応用ではシステムに要求されるホールドアップタイムを満足できるように、出力コンデンサーの容量を調整願います。また、出力リップル仕様を定義した場合は、出力リップル仕様を満たすのに必要な容量を算出し、ホールドアップタイムを満足する容量と比較し、大きい容量値を使用する必要があります。また、コンデンサー選定時には、公差や経年劣化を考慮する必要があります。

ご利用規約

本規約は、お客様と東芝デバイス&ストレージ株式会社（以下「当社」といいます）との間で、当社半導体製品を搭載した機器を設計する際に参考となるドキュメント及びデータ（以下「本リファレンスデザイン」といいます）の使用に関する条件を定めるものです。お客様は本規約を遵守しなければなりません。

第1条 禁止事項

お客様の禁止事項は、以下の通りです。

1. 本リファレンスデザインは、機器設計の参考データとして使用されることを意図しています。信頼性検証など、それ以外の目的には使用しないでください。
2. 本リファレンスデザインを販売、譲渡、貸与等しないでください。
3. 本リファレンスデザインは、高温・多湿・強電磁界などの対環境評価には使用できません。
4. 本リファレンスデザインを、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しないでください。
5. 本リファレンスデザインを、当社が定める注意事項に反する態様で使用しないでください。

第2条 保証制限等

1. 本リファレンスデザインは、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。
2. 本リファレンスデザインは参考用のデータです。当社は、データ及び情報の正確性、完全性に関して一切の保証をいたしません。
3. 半導体素子は誤作動したり故障したりすることがあります。本リファレンスデザインを参考に機器設計を行う場合は、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します。また、使用されている半導体素子に関する最新の情報（半導体信頼性ハンドブック、仕様書、データシート、アプリケーションノートなど）をご確認の上、これに従ってください。
4. 本リファレンスデザインを参考に機器設計を行う場合は、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下さい。当社は、適用可否に対する責任を負いません。
5. 本リファレンスデザインは、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又は実施権の許諾を行うものではありません。
6. 当社は、本リファレンスデザインに関して、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。）をせず、また当社は、本リファレンスデザインに関する一切の損害（間接損害、結果的損害、特別損害、付随的損害、逸失利益、機会損失、休業損害、データ喪失等を含むがこれに限らない。）につき一切の責任を負いません。

第3条 契約期間

本リファレンスデザインをダウンロード又は使用することをもって、お客様は本規約に同意したものとみなされます。本規約は予告なしに変更される場合があります。当社は、理由の如何を問わずいつでも本規約を解除することができます。本規約が解除された場合は、お客様は本リファレンスデザインを破棄しなければなりません。さらに当社が要求した場合には、お客様は破棄したことを証する書面を当社に提出しなければなりません。

第4条 輸出管理

お客様は本リファレンスデザインを、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てはなりません。また、お客様は「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なければなりません。

第5条 準拠法

本規約の準拠法は日本法とします。

第6条 管轄裁判所

本リファレンスデザインに関する全ての紛争については、別段の定めがない限り東京地方裁判所を第一審の専属管轄裁判所とします。