

# 5 kW 絶縁双方向 DC-DC コンバーター

# デザインガイド

RD167-DGUIDE-02

---

**東芝デバイス&ストレージ株式会社**

## 目次

|                          |          |
|--------------------------|----------|
| <b>1. はじめに</b> .....     | <b>3</b> |
| 1.1. 搭載パワーMOSFET .....   | 3        |
| <b>2. 回路設計</b> .....     | <b>4</b> |
| 2.1. 高圧側回路設計 .....       | 4        |
| 2.2. トランス、インダクター選定 ..... | 6        |
| 2.3. 低圧側回路設計 .....       | 7        |

## 1. はじめに

本デザインガイドは 5 kW 絶縁双方向 DC-DC コンバーター（以下、本電源）の各種回路の設計方法を記載したドキュメントです。本電源の仕様、使用方法、特性データはリファレンスガイドを参照してください。

なお、回路図に部品番号を記載していても、部品表で「Not Mounted」となっているものは PCB に実装しておりません。回路設計時の定数値調整用として PCB に実装場所を設けています。

### 1.1. 搭載パワー-MOSFET

本電源は、高圧側ブリッジに 1200 V 耐圧の SiC MOSFET (TW070J120B)を、低圧側ブリッジに 650 V 耐圧の MOSFET (TK49N65W5) をスイッチング素子として採用しています。

#### TW070J120B

高圧側ブリッジに搭載

$V_{DSS} = 1200 \text{ V}$ 、 $R_{DS(ON)}@V_{GS} = 20 \text{ V (typ.)} = 70 \text{ m}\Omega$ 、TO-3P(N)パッケージ  
SiC ショットキーバリアダイオードを内蔵し、逆方向電流印加時の損失低減を実現

#### TK49N65W5

低圧側ブリッジに搭載

$V_{DSS} = 650 \text{ V}$ 、 $R_{DS(ON)}@V_{GS} = 10 \text{ V (typ.)} = 51 \text{ m}\Omega$ 、TO-247 パッケージ  
高速内蔵ダイオードプロセス品、逆回復動作時の損失低減を実現

## 2. 回路設計

本電源の回路設計のポイントを記載します。

### 2.1. 高圧側回路設計

本項では、本電源の高圧側回路の設計に関して説明します。

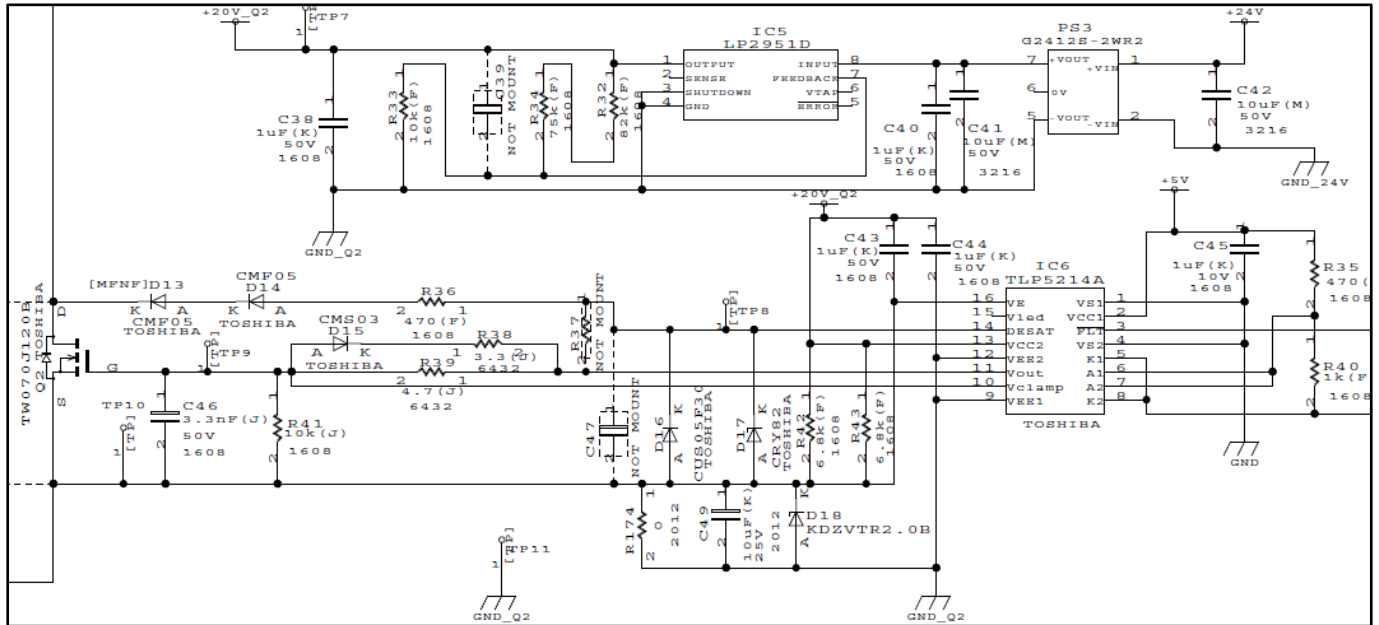


図 2.1 ゲート駆動回路 (高圧側下アーム)

### 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 2.1 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。本電源のゲート駆動回路は、MOSFET のスイッチングスピード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 のターンオンスピードだけでなくターンオフスピードも低下するため、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 のターンオフスピード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 のターンオフスピード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 2.1 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・カップラー (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。本電源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。本電源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、1 μF 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。本電源では 2 V 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、 $Cout_{high} = 705 \mu F$  ((470 μF の 2 直列) の 3 並列)、 $Vout_{high} = 750 V$ 、 $Vout_{high\_min} = 700 V$ 、 $Pout = 5 kW$  で、ホールドアップタイムは 5.11 ms 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。

## 2.2. 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 400 V の比 ( $750/400=1.875$ ) と同等になるように設定します。本電源では、 $n_1/n_2 = 28/15 (=1.87)$  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 (L11,L12) の選定方法について説明します。本電源の最大出力電力は 5kW 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) :  $\theta$  (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 15 kW、 $V_{out}$  を 750 V とすると、インダクター電流  $I_L$  は 40 A となります。

この  $I_L = 40$  A を位相差 $\theta$ 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 50 kHz、 $\theta$  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  $\mu$ H と算出されるため、本電源では 6  $\mu$ 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。

### 2.3. 低圧側回路設計

本項では、本電源の低圧側回路の設計に関して説明します。

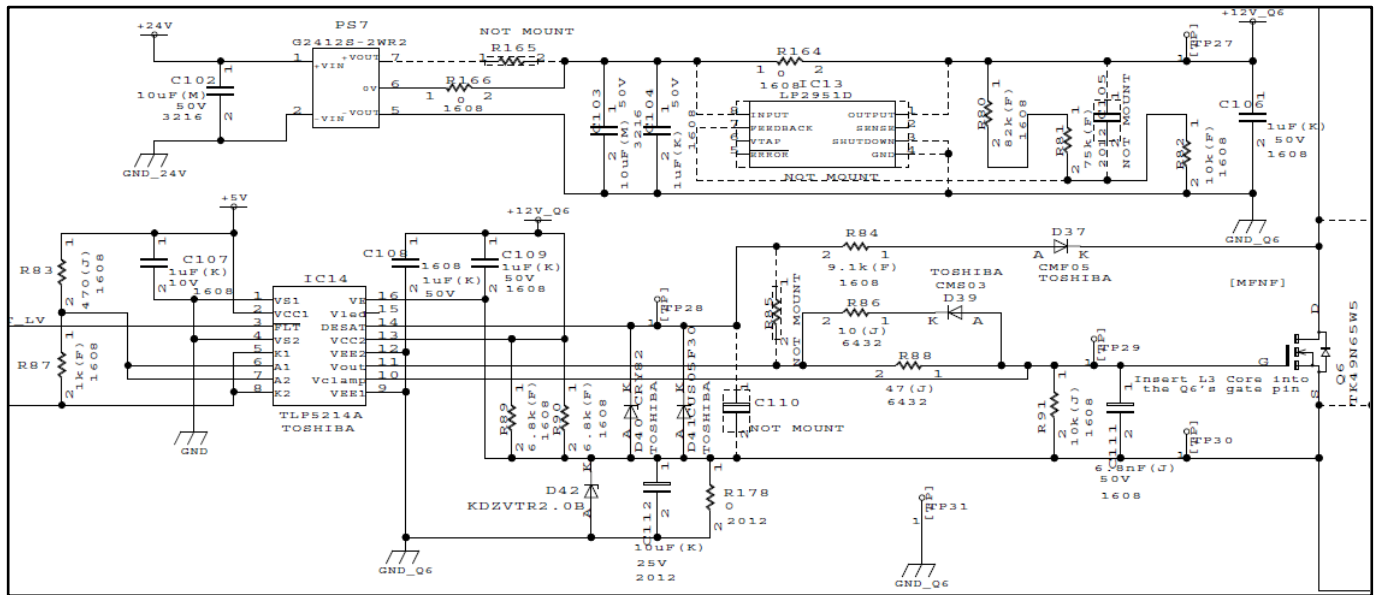


図 2.2 ゲート駆動回路（低圧側下アーム）

#### 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 Q6 のゲート駆動回路を図 2.2 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。本電源のゲート駆動回路は、MOSFET のスイッチングスピード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 (R88) 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 のターンオンスピードだけでなくターンオフスピードも低下するため、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 のターンオフスピードのみを上げる必要があります。ゲート直列抵抗 (R86) を小さな値に変更することで MOSFET のターンオフスピード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 2.2 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ップラ (IC14) 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。本電源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。本電源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 (D42) 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。D42 と並列に配置した 0 Ω 抵抗 (R178) を外し、1 μF 程度のコンデンサを配置することで、ゲートオフ時にツェナー電圧分の負バ

iasがゲートに印加されます。本電源では 2 V 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  $\mu\text{F}$  の 6 並列)、 $Vout_{low} = 400 \text{ V}$ 、 $Vout_{low\_min} = 370 \text{ V}$ 、 $Pout = 5 \text{ kW}$  で、ホールドアップタイムは 6.51 ms 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。

本電源では、PWM コントローラーとして Texas Instruments 社の TMS320F28377SPTP を使用し、ヘッドスプリング社製のソフトウェアライブラリーを使用して制御ソフトウェアを作成しています。コントローラー、ソフトウェアライブラリーの詳細は、メーカーの製品データシート、関連ドキュメントを参照願います。本電源で使用したソフトウェアとその概要は「サンプルソフトウェア」を参照願います。



## 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。本リファレンスデザインをダウンロードすることをもって、お客様は本規約に同意したものとみなされます。なお、本規約は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。またお客様が本規約に違反した場合は、お客様は、本リファレンスデザインを破棄し、その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。

### 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、データおよび情報の正確性、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また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、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 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4条 準拠法

本規約の準拠法は日本法とします。