

Application Note

車載システム向けの DC リンク コンデンサのプリチャージ設計



Daniel Gao, Forest Fu

概要

ハイブリッド電気自動車と電気自動車 (HEV/EV) では、DC リンク コンデンサのプリチャージが不可欠です。従来のプリチャージ回路には、高価な電気機械リレー (EMR) と多くの大電力抵抗が組み込まれており、これらは高い電力密度と部品表 (BOM) コストの削減という要件に反するものです。このアプリケーション ノートでは、絶縁型スイッチングドライバ、アクティブ プリチャージ コントローラ、高電圧 (HV) 降圧コンバータ、絶縁型 DC/DC コンバータなど、いくつかの代替プリチャージ設計を、それぞれの制御手法とともに紹介します。これらの設計は、電力密度、部品コスト、機能安全パラメータに関して明確な比較上の利点があります。

目次

1 はじめに.....	2
2 DC リンク コンデンサのプリチャージに関するシステムの課題.....	3
3 システム手法.....	4
3.1 絶縁型スイッチ ドライバ.....	4
3.2 アクティブ プリチャージ コントローラ.....	5
3.3 ディスクリット高電圧降圧設計.....	7
3.4 独立した絶縁型 DCDC 昇圧設計.....	10
3.5 統合型プリチャージ設計.....	12
3.5.1 双方向の高電圧から低電圧への変換 (HV-LV) DCDC.....	12
3.5.2 バッテリヒータ.....	13
4 まとめ.....	16
5 用語.....	16
6 参考資料.....	16
7 改訂履歴.....	17

商標

すべての商標は、それぞれの所有者に帰属します。

1 はじめに

HEV/EV システムでは、HV バッテリーに蓄積されたエネルギーから高電圧の負荷に直接電力が供給されるわけではありません。HV バッテリーと HV 負荷の間に DC リンクコンデンサが配置され、バッファ段として機能します。DC リンクコンデンサは、HV バッテリーと HV 負荷の間の寄生インダクタンスによる影響のデカップリングと、高周波電流用に低インピーダンスのパスを提供するという、2 つの主な機能を果たします。DC リンクの容量は通常、数百 μF から数千 μF の範囲です。

ただし、HV 負荷が非アクティブのとき、DC リンクコンデンサに電圧は存在しません。図 1-1 に示すように、メインコンタクタの正電圧 (MCP) とメインコンタクタの負電圧 (MCN) はオープンのまま、両方の端子で HV バッテリーを HV 負荷から切断しながら、DC リンクコンデンサが放電状態を維持します。MCP と MCN が閉じると、実質的に DC リンクコンデンサが直接短絡し、非常に大きな電流が発生します。この突入電流を適切に制限しなければ、ケーブル、コネクタ、ヒューズが破損する恐れがあります。

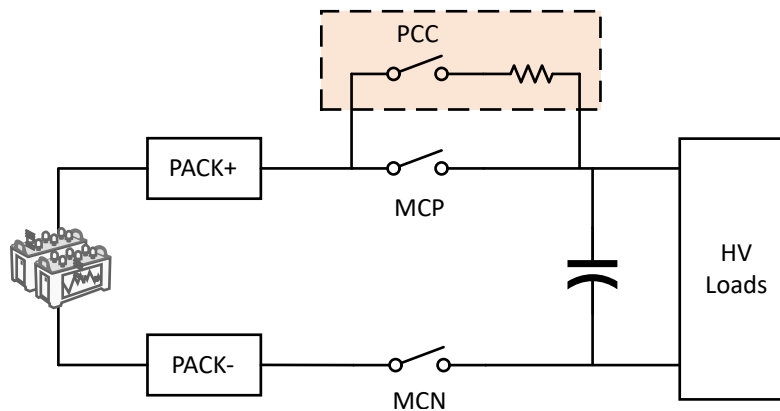


図 1-1. HEV/EV システムの DC リンクコンデンサ

したがって、HV システムには突入電流を制限するためのプリチャージ回路が必要です。従来型のプリチャージ回路は、プリチャージコンタクタ (PCC) と電流制限抵抗で構成されます。プリチャージフェーズ中は PCC と MCP が閉じ、HV バッテリーとほぼ同じ電圧まで DC リンクコンデンサを充電します。このフェーズでは、回路の電流制限抵抗により突入電流が制限されます。プリチャージフェーズの後で PCC が開き、MCP が閉じて、HV バッテリーから負荷に電力を供給できるようになります。電流制限抵抗はバイパスされ、回路のインピーダンスが減少します。従来型のプリチャージ回路には、一般に高コストの EMR と多くの大電力抵抗が組み込まれており、これらは高い電力密度と BOM コストの削減という要件に反するものです。

2 DC リンク コンデンサのプリチャージに関するシステムの課題

DC リンク コンデンサの容量は、トラクション インバータの出力電力に応じて変化しますが、数百 μF から数千 μF の範囲です。DC リンク コンデンサのプリチャージ時間は 400ms を超えないようにする必要があります。DC リンク コンデンサのプリチャージのため従来から利用されてきた方法では、電気機械リレーを使用します。この方法の動作原理については第 1 章で解説しました。以下のセクションでは、パラメータ設計の方法について詳しく説明します。図 2-1 に示すように、プリチャージ コンタクトが閉じたとき、等価回路は標準の RC 直列構成を形成します。

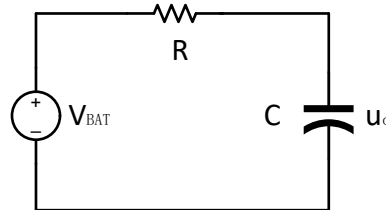


図 2-1. プリチャージ回路の等価回路

DC リンク コンデンサの両端の電圧は次のように表されます。

$$u_C = V_{\text{BAT}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \tau = RC \quad (1)$$

HV バッテリーが 800V、DC リンク容量が 1000 μF 、プリチャージ時間の要件が 150ms と想定します。プリチャージ時間の要件に応じて抵抗を選択します。

$$t = 3\tau \leq 150\text{ms} \quad (2)$$

$$R \leq \frac{t/3}{C} = 50\Omega \quad (3)$$

プリチャージ抵抗の平均電力を選択します。

$$P_{\text{AVG}} = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} C (0.95 V_{\text{BAT}})^2 / t = 1925\text{W} \quad (4)$$

プリチャージ抵抗とリレーのピーク電流を選択します。

$$I_{\text{PEAK}} = \frac{V_{\text{BAT}}}{R} = 16\text{A} \quad (5)$$

計算に従い、プリセットされたパラメータについて抵抗と 16A リレーを選択する必要があります。実用的な回路設計の実装では、パラメータのデレーティングを考慮する必要があります。これには、このプリチャージ回路で高価なリレーと多くの大電力抵抗を使用する必要があります。

HEV/EV システムのコスト削減と容量の最適化への需要が高まるなか、従来型のプリチャージ回路に置き換わるいくつかの代替設計が新しく登場しています。これらの設計については、以下のセクションで分析と比較を行います。

3 システム手法

市場にはいくつものプリチャージの設計が存在し、プリチャージに特化した回路を使用するか、HEV/EV システム内の既存の回路を活用しています。このアプリケーション ノートでは、テキサス・インスツルメンツから提供されているさまざまな設計と主要なデバイスの動作原理について解説します。

3.1 絶縁型スイッチドライバ

TPSI3050-Q1 は、完全に統合された絶縁型スイッチドライバです。外部パワー スイッチと組み合わせると、包括的な絶縁型ソリッド ステートリレー (SSR) を形成します。SSR には EMR と比べて、次の 3 つの大きな利点があります。

- 絶縁型スイッチドライバ: 外付けの電界効果トランジスタ (FET) または絶縁型ゲートバイポーラトランジスタ (IGBT) を柔軟に駆動できます。機械式リレーに比べて、SSR は信頼性の向上、重量の軽減、サイズの小型化が示されています。機械的な可動接点がないため、可聴ノイズと回路の物理的な劣化が排除されます。
- スイッチの高速な非アクティブ化: 応答時間は $3\mu\text{s}$ 未満です。これに対してリレーの動作時間は通常 $1 \sim 50\text{ms}$ の範囲です。この時間は、過熱や過電流などの条件が発生したときの保護において重要です。
- 2 次側バイアス電源の生成: 1 次側で受け取った電力から、2 次側バイアス電源を生成します。2 次側は、各種のパワー スイッチを駆動するために、 10V のレギュレートされたフローティング電源レールを供給します。

図 3-1 に、このアプリケーションのブロック図を示します。TPSI3050-Q1 は、マイコンからの EN 信号によって制御されます。VDRV ピンは、共通ソース構成で双方向 MOSFET を駆動します。

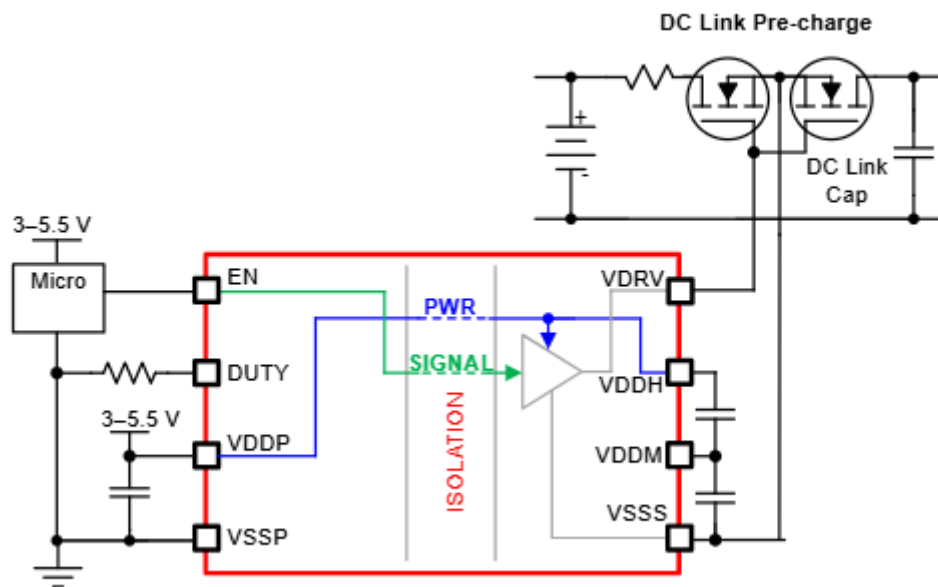


図 3-1. アプリケーション内の TPSI3050-Q1 のブロック図

要約すると、この設計と、図 1-1 に示されている方法との主な違いは、選択する部品です。TPSI3050-Q1 は、従来型のプリチャージ機械式リレーの代わりに使用でき、信頼性の向上、サイズの小型化、応答特性の向上を実現します。詳細については、TIDA-050080 を参照してください。

3.2 アクティブ プリチャージ コントローラ

TPSI31P1-Q1 は、17V の絶縁型ゲートドライバとバイアス電源を搭載したアクティブ プリチャージ コントローラとして機能します。外部パワー スイッチ、パワー インダクタ、ダイオードと組み合わせることで、アクティブ プリチャージの設計を構成できます。TPSI3050-Q1 と比較して、TPSI31P1-Q1 にはプリチャージ アプリケーション用として特別に設計された 2 つの追加機能が搭載されています。

- インダクタ電流はヒステリシス動作モードで継続的に監視および制御され、DC リンク コンデンサの実容量をリニアに充電します。
- このデバイスには通信バックチャネルが統合されており、2 次側から 1 次側にステータス情報を送信し、2 次側の電源ステータスを通知します。

図 3-2 に、このアプリケーションのブロック図を示します。TPSI31P1-Q1 は、マイコンからの EN 入力を介して制御信号を受信します。外部パワー インダクタ (L1) と、パワー ダイオード (D1) およびパワー FET (M1) とを組み合わせ、降圧コンバータを形成します。M2 は、リバースブロッキング機能用のオプションの MOSFET を表します。シャント抵抗により、IS+ ピンの電圧測定による L1 の電流監視が容易に行えます。

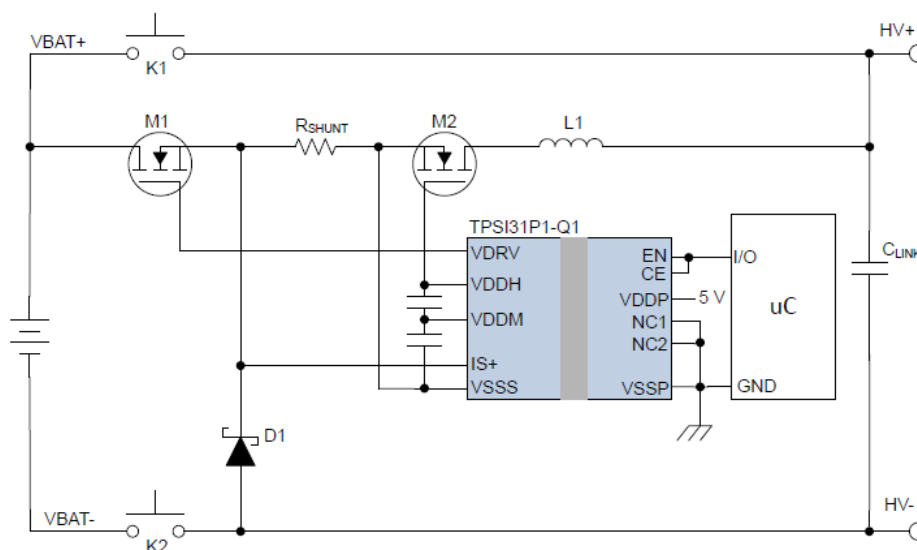


図 3-2. アプリケーション内の TPSI31P1-Q1 のブロック図

動作上の主な特長は、降圧コンバータの構成です。IS+ が VREF- を下回ると、VDRV が High にアサートされて M1 がアクティブになり、降圧コンバータのエネルギー ストレージ サイクルを開始します。IS+ が VREF+ を上回ると、VDRV が Low にアサートされて M1 が非アクティブになり、降圧コンバータの電力転送サイクルを開始します。このプロセスはプリチャージ サイクル全体にわたって続けられ、充電電流をレギュレートします。

HV バッテリーが 800V、DC リンク容量が 1000μF、プリチャージ時間の要件が 150ms と想定します。平均充電電流は、次のように計算できます。

$$I_{AVG} \geq \frac{C \times V_{BAT}}{t} = 5.33A \quad (6)$$

インダクタ電流の設定に必要なシャント抵抗は、次のように計算できます。

$$R_{SNS} \leq \frac{V_{REF+} + V_{REF-}}{2 \times I_{AVG}} = 130m\Omega \quad (7)$$

最大インダクタ電流は次のように計算できます。

$$I_{PEAK} = \frac{V_{REF+}}{R_{SNS}} = 9.46A \quad (8)$$

最小インダクタ電流は次のように計算できます。

$$I_{\text{MIN}} = \frac{V_{\text{REF}} -}{R_{\text{SNS}}} = 1.23\text{A} \quad (9)$$

最大スイッチング周波数は、リンク容量の両端の電圧が中間値に達したときに発生します。この値は、TPSI31P1 の最小電力転送能力、FET の総ゲート電荷、ゲートとソースの間の電圧によって決定できます。P = 55mW、V_{gs} = 15V、Q_g = 14nC と仮定すると、最大スイッチング周波数は次のように計算できます。

$$f_{\text{MAX}} = \frac{P}{V_{\text{gs}} \times Q_{\text{g}}} = 261.9\text{kHz} \quad (10)$$

最大スイッチング周波数に基づき、最小インダクタンスは次のように計算できます。

$$L_{\text{MIN}} \geq \frac{V_{\text{BAT}}}{4 \times f_{\text{MAX}} \times (I_{\text{PEAK}} - I_{\text{MIN}})} = 92.8\mu\text{H} \quad (11)$$

したがって、100uH のインダクタンス値を選択できます。C_{DIV1} および C_{DIV2} コンデンサは、VDDH の降下要件に依存します。たとえば、C_{DIV1} と C_{DIV2} の直列の組み合わせによって形成される合計容量により、VDDH 電源レールが 0.5V 降下する必要があります。

$$C_{\text{DIV1}} \parallel C_{\text{DIV2}} \geq \frac{Q_{\text{G}}}{\Delta V} = 28\text{nF} \quad (12)$$

電圧降下をさらに小さくするため、C_{DIV1} = 330nF、C_{DIV2} = 1μF のコンデンサを選択することもできます。

TPSI31P1-Q1 には、これらの式を組み込んで予測される充電波形を生成するカリキュレータが搭載されています。詳細については、[TPSI31P1-CALC](#) を参照してください。

3.3 ディスクリート高電圧降圧設計

ディスクリート HV 降圧設計は、DC リンク コンデンサをプリチャージするための別の方法です。この方法は、電力段の設計において TPSI31P1-Q1 と類似していますが、制御方法が大きく異なります。

図 3-3 に、ディスクリート HV 降圧設計のブロック図を示します。OBC/DCDC / インバータ用のマイコン ユニット (MCU) は、バッテリー管理システム (BMS) から HV バッテリ電圧情報を取得し、HV 降圧コンバータの出力電圧を構成してから、RELAY2 を閉じて、DC リンク コンデンサのプリチャージを開始します。完了すると、READY 信号が BMS に送信され、RELAY1 が閉じます。

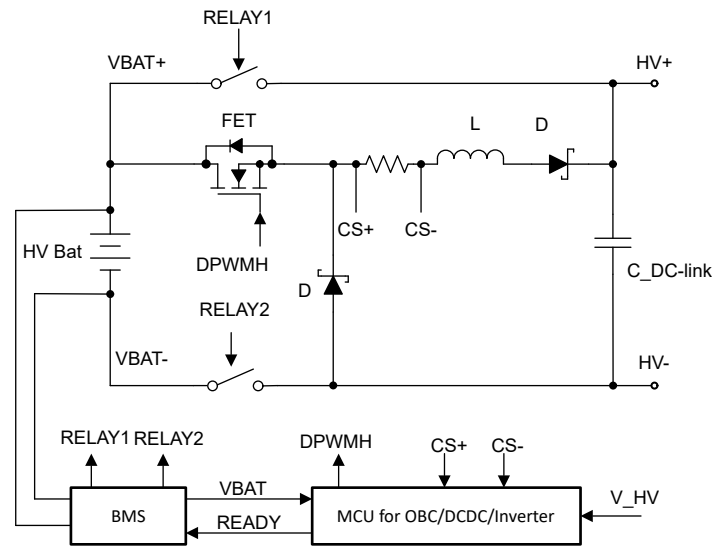


図 3-3. ディスクリート HV 降圧設計のブロック図 1

図 3-4 に、DC リンク コンデンサのプリチャージ用の代替ディスクリート HV 降圧設計を示します。OBC/DCDC / インバータ用の MCU は、BMS から HV バッテリ電圧データを受信し、HV 降圧コンバータの出力電圧パラメータを設定してから、RELAY1 をアクティブにし、DC リンク コンデンサのプリチャージプロセスを開始します。完了すると、READY 信号が BMS に送信され、RELAY2 がアクティブになります。この構成では、コントローラと FET は VBAT- を基準としており、FET をアクティブ化するために必要なのはローサイドドライバのみですが、HV 降圧設計 1 では FET をアクティブ化するための絶縁型ドライバが必要です。

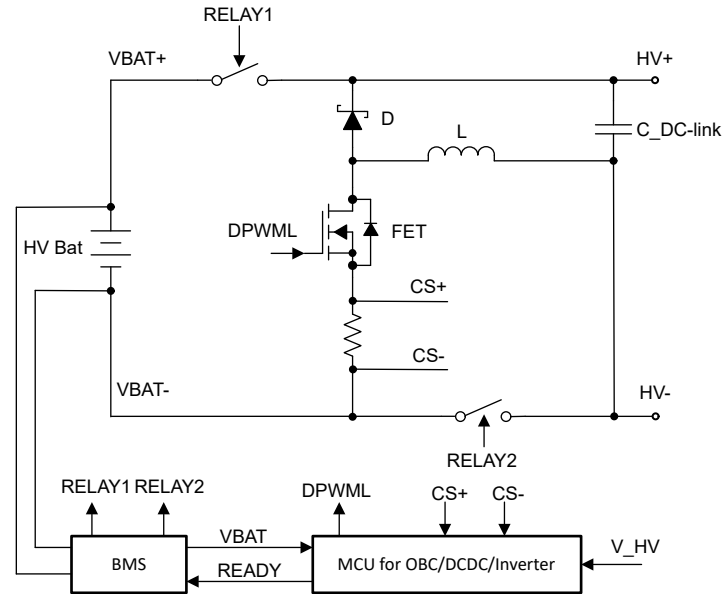


図 3-4. ディスクリート HV 降圧設計のブロック図 2

たとえば、DC バス電圧が 400V、DC リンク コンデンサ容量が 600 μ F、プリチャージ時間の要件が 200ms 未満と仮定すると、平均電流は次のように計算できます。

$$I = \frac{C \times U}{t} = \frac{600\mu\text{F} \times 400\text{V}}{200\text{ms}} = 1.2\text{A} \quad (13)$$

平均電流は約 1.2A で、平均電力は 480W になります。スイッチング周波数が 200kHz、出力電圧は 380V と想定します。降圧インダクタのインダクタンスは次のように計算できます。

$$L = \frac{V_{\text{out}} \times \text{toff}}{\Delta I} = \frac{380\text{V} \times (1 - 380\text{V}/400\text{V})}{0.4 \times 1.2\text{A} \times 200\text{kHz}} = 197\mu\text{H} \quad (14)$$

図 3-5 に、前述の計算に基づく SIMetrix シミュレーション回路を示します。シミュレーション結果は図 3-6 に示します。インダクタを流れる最大突入電流は 4A です。PQ32 コアの断面積 (A_e) が 154mm² の場合、回転比は次のように計算できます。

$$N = \frac{L \times \Delta I}{A_e \times \Delta B} = \frac{197\mu\text{H} \times 4\text{A}}{154\text{mm}^2 \times 0.3\text{T}} = 17 \quad (15)$$

突入電流のマージンを考慮して、巻線比は 20 に設定できます。降圧インダクタは高電圧アプリケーション用の定格にする必要があることに注意してください。インダクタに十分な飽和電流容量が存在することが検証されれば、降圧インダクタのインダクタンス値を減らしてもかまいません。

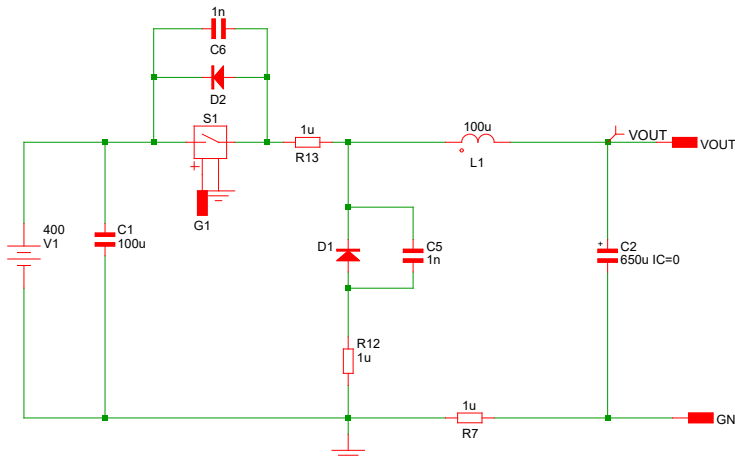


図 3-5. HV 降圧設計用の SIMetrix シミュレーション回路

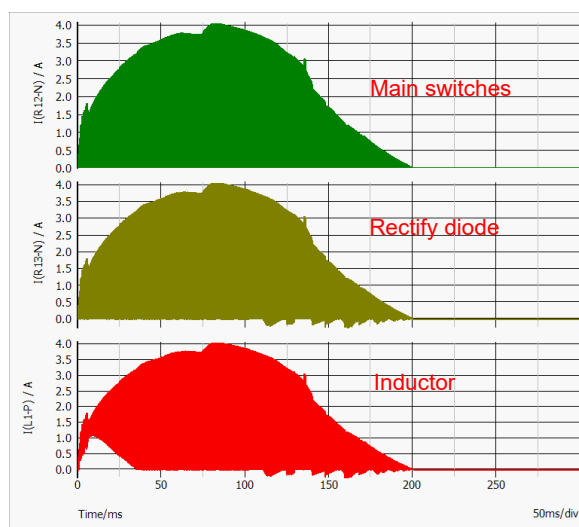


図 3-6. HV 降圧設計用の SIMetrix のシミュレーション結果

表 3-1 に、ディスクリート HV 降圧設計で使用される主要な部品の一覧を示します。OBC/DCDC / インバータに含まれている既存の MCU は転用できます。絶縁型ドライバにより、ハイサイド FET が簡単にアクティブ化できます。図 3-3 および図 3-4 に示すブロック図では、シャント部品をホール センサとして実装することもできます。

表 3-1. TI 部品

	部品番号	仕様
MCU	F29H859TU-Q1	C2000 シリーズ
コントローラ	UCC28740-Q1	1.HV 降圧コントローラ 2.バイアス電源、400V/800V を 12V/24V に転送
絶縁型ドライバ	UCC21351-Q1	基本絶縁型
絶縁型ドライバ	UCC21551-Q1	強化絶縁型
絶縁型ドライバ	UCC5350L-Q1	強化絶縁型
ホール センサ	TMCS1133-Q1	CT の代替品
LLC コンバータ	UCC25800-Q1	バイアス電源、12V を 12V/24V に転送

3.4 独立した絶縁型 DCDC 昇圧設計

HV-LV DCDC コンバータに双方向機能がないシステムでは、独立した絶縁型 DCDC 昇圧設計が現実的な代替選択肢となります。この方法により、LV バッテリによる DC リンクコンデンサのプリチャージも簡単に使用できます。平均電力要件を考慮すると、一般的にプッシュプルトポロジが好まれます。

図 3-7 に、この独立した絶縁型 DCDC 設計のブロック図を示します。OBC/DCDC / インバータ用の MCU は、BMS から HV バッテリ電圧情報を受信し、絶縁型 DCDC コンバータの出力電圧を構成して、DC リンクコンデンサのプリチャージプロセスを開始します。完了すると、READY 信号が BMS に送信され、RELAY1 および RELAY2 がアクティブになります。

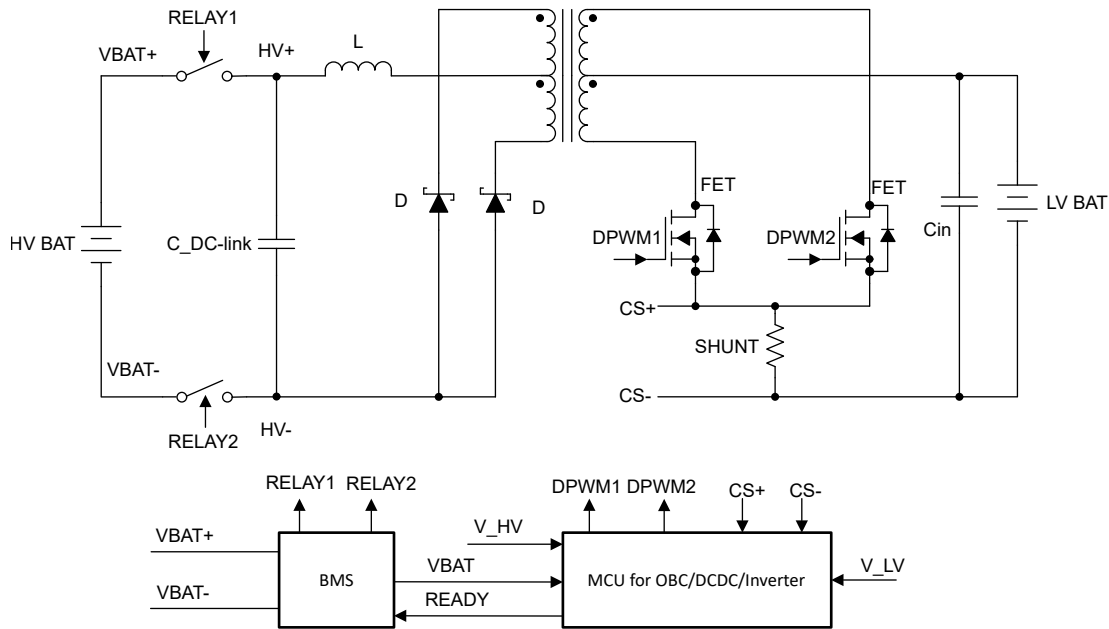


図 3-7. 独立した DCDC 設計のブロック図

400V の DC バス電圧と 600 μ F DC リンクコンデンサを例にして、LV バッテリ電圧の範囲を 9V ~ 16V とすると、1:50 のトランスの巻線比を設定できます。式 1 から、平均電流は 1.2A です。IL を 0.3I_{out} に、スイッチング周波数を 100kHz に設定します。

$$D = \frac{N_{ps} \times (V_{out} + V_d)}{V_{in}} = \frac{400v + 1v}{50 \times 12V} = 0.668 \quad (16)$$

$$I_{out} = \frac{(V_{out} + V_d) \times (1 - D)/2}{\Delta I \times f_{sw}} = \frac{(400v + 1v) \times (1 - 0.668)/2}{0.3 \times 1.2A \times 200kHz} = 924\mu H \quad (17)$$

計算されるインダクタンスの値は 924 μ H ですが、シミュレーションではインダクタの突入電流と巻線数を考慮して 500 μ H を使用します。図 3-8 に、これらの計算に基づく SIMetrix シミュレーション回路を示します。シミュレーション結果は図 3-9 に示します。

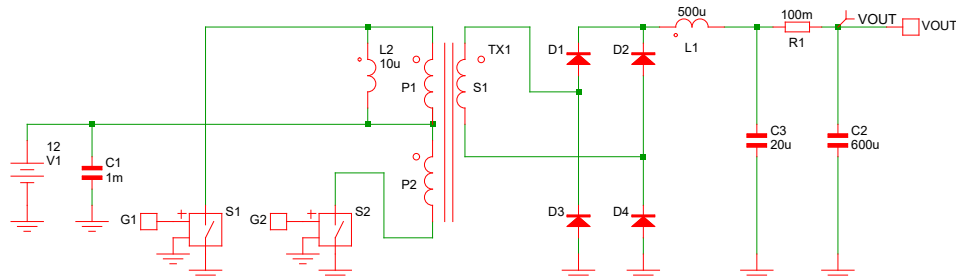


図 3-8. 独立した DCDC 設計用の SIMetrix シミュレーション回路

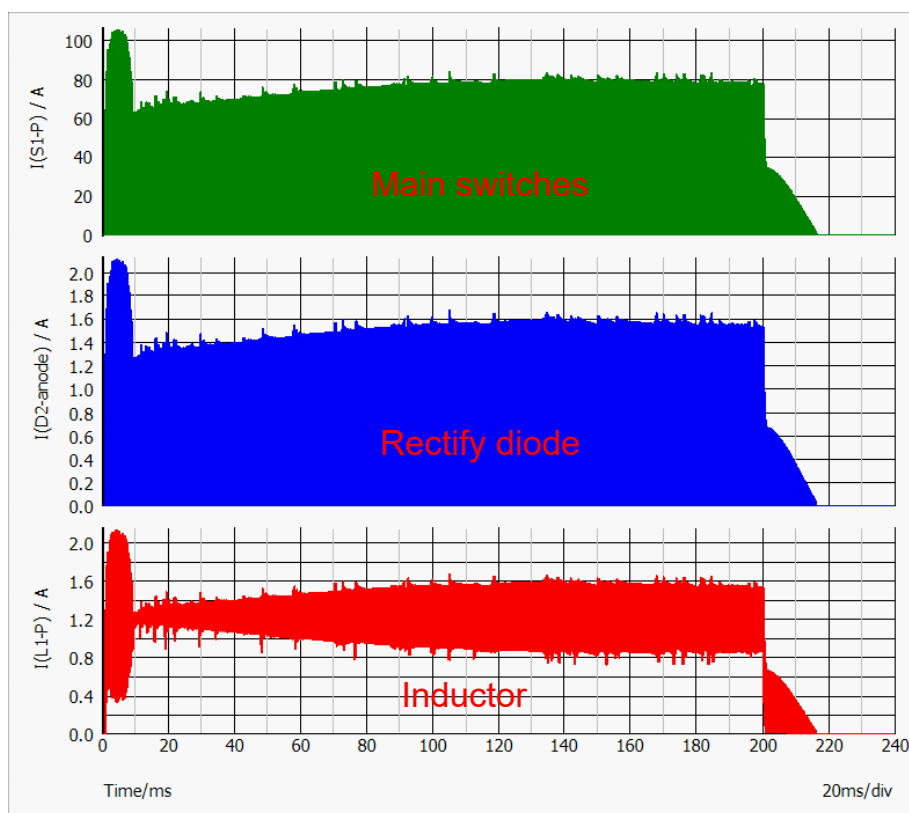


図 3-9. 独立した DCDC 設計の SIMetrix シミュレーション結果

表 3-2 に、独立した DCDC 設計で使用される主要なコンポーネントの一覧を示します。OBC/DCDC / インバータの既存の MCU を転用して PWM 信号を生成し、閉ループ制御を実装できます。マイコンの帯域幅の制約がある場合、LM25037-Q1 を制御機能に、ISOM8110-Q1 を絶縁型帰還に使用できます。

表 3-2. TI 部品

	部品番号	仕様
マイコン	F29H859TU-Q1	C2000 シリーズ
ローサイドドライバ	UCC27524A-Q1	2 チャンネル
ローサイドドライバ	UCC27518A-Q1	1 チャンネル
プッシュプル コントローラ	LM25037-Q1	
光学エミュレータ	ISOM8110-Q1	フォトカブラ

3.5 統合型プリチャージ設計

自動車メーカーは、専用ハードウェアを実装しなくても、バッテリー管理システム (BMS) や HV-LV DC/DC コンバータなど既存の自動車の ECU を活用し、洗練されたソフトウェア アルゴリズムを使用してプリチャージシーケンスを調整できます。自動車の既存の電子アーキテクチャにプリチャージ機能を組み込むことで、高電圧パワートレイン部品向けに堅牢な保護を維持しながら、より効率的なシステム設計を実現できます。

3.5.1 双方向の高電圧から低電圧への変換 (HV-LV) DCDC

HEV/EV システムでは、HV-LV DCDC コンバータが HV バッテリーと接続して HV バッテリーから LV バッテリーへの電力を変換し、LV 負荷に電力を供給します。図 3-10 に示すように、双方向機能を利用して DC リンク コンデンサのプリチャージを行えます。

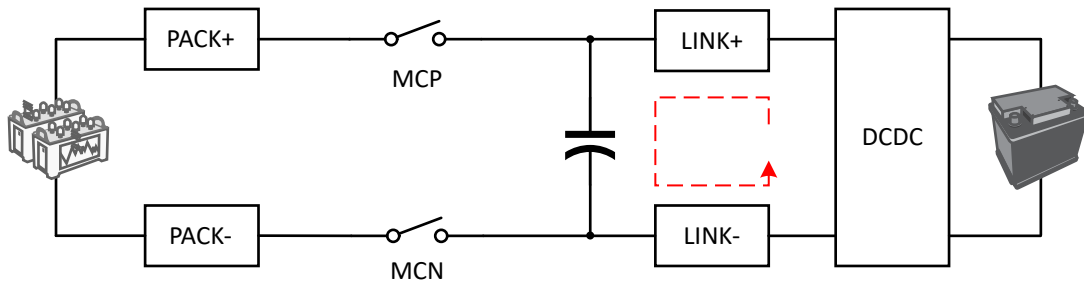


図 3-10. HV-LV DCDC を使用したプリチャージ回路

HV-LV DCDC トポロジで位相シフトフルブリッジ (PSFB) 構成が使用されている場合の反転制御動作のブロック図を、図 3-11 に示します。このプロセスは、エネルギー ストレージと電力転送サイクルに分割できます。

- エネルギー ストレージ サイクル：
 - 2 次側では、Q5、Q6、Q7、Q8 がオンになります。2 次側は昇圧コンバータとして動作し、出力インダクタを充電します。
 - 1 次側では、Q2 と Q4 がオンになります。リーケージ インダクタンスに基づいて電流を流すために、1 次側はフリーホイール段です。
- 電力転送サイクル：
 - 図 3-11 の赤い線は、電流パスの例です。
 - Q1、Q4、Q5、Q8 がオンになり、LV バッテリーおよび出力インダクタから HV バッテリーにエネルギーを転送します。

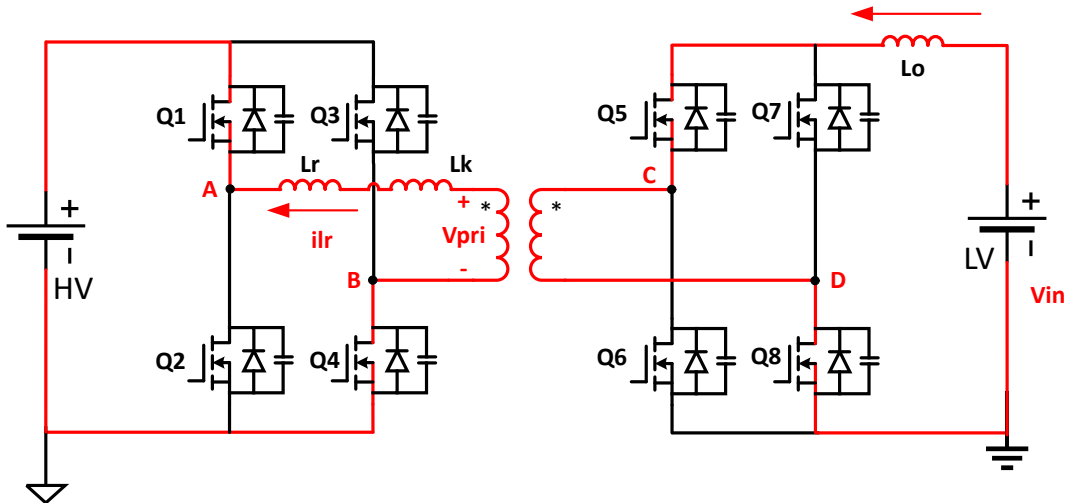


図 3-11. PSFB 反転制御のブロック図

この設計の主な考慮事項は、電流の不一致に起因して 2 次側パワー スイッチで電圧スパイクが発生することです。PMP41078 は、リバース モード動作が可能な 3.5kW 400V から 14V の HV-LV DCDC のリファレンス デザインを表します。詳細については、[PMP41078](#) を参照してください。

3.5.2 バッテリヒータ

図 3-12 に、DC リンク コンデンサを正の方向からプリチャージする統合型設計のブロック図を示します。最初に KL1 が閉じ、Q7 と Q3 がアクティブになってインダクタ L1 を充電します。その後で Q7 が非アクティブになり、インダクタ電流が Q3、HV_BAT、KL1、C_DC_link、Q4 を流れます。このプロセスにより、C_DC_Link がバッテリー電圧にプリチャージされます。その後で、HV_BAT と C_DC_Link の間の並列接続を確立するため、Q1 と Q2 がアクティブになります。

バッテリーのヒーティングが必要な場合、Q1 と Q2 が非アクティブ、Q3 と Q7 がアクティブになって L1 を充電します。次に、Q7 が非アクティブに、Q4 がアクティブになり、DC リンク コンデンサに HV_BAT を上回る電圧が発生します。L1 の電流の方向が反転してから、DC リンク コンデンサが HV_BAT に放電されます。その後で Q4 が非アクティブに、Q7 がアクティブになり、HV_BAT の電圧が DC リンク コンデンサの電圧を上回ります。L1 の電流が再度反転してから、次のサイクルが開始されます。この制御方法により、HV_BAT と DC リンク コンデンサの間のエネルギー発振が発生し、HV_BAT がヒーティングされます。

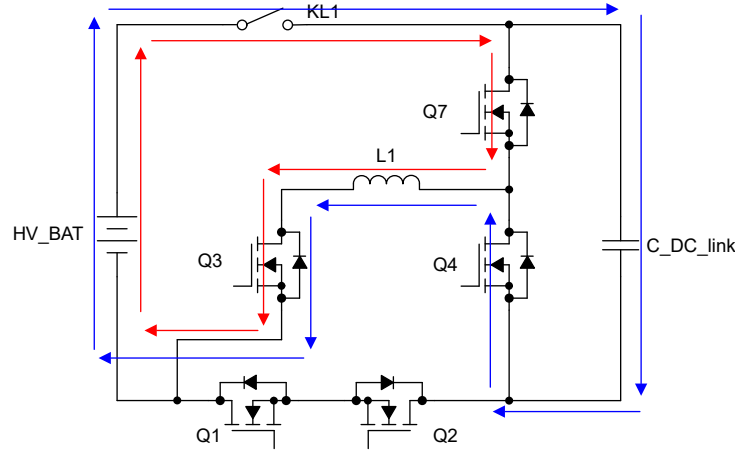


図 3-12. 統合プリチャージ設計のブロック図 1

図 3-13 に、DC リンク コンデンサを負の方向からプリチャージする統合型設計のブロック図を示します。最初に KL1 がアクティブになり、Q5 と Q8 がアクティブになってインダクタ L1 を充電します。その後で Q8 が非アクティブになり、インダクタ電流が Q6、C_DC_Link、KL1、HV_BAT、Q5 を流れます。このプロセスにより、C_DC_Link がバッテリー電圧にプリチャージされます。その後で、HV_BAT と C_DC_Link の間の並列接続を確立するため、Q1 と Q2 がアクティブになります。

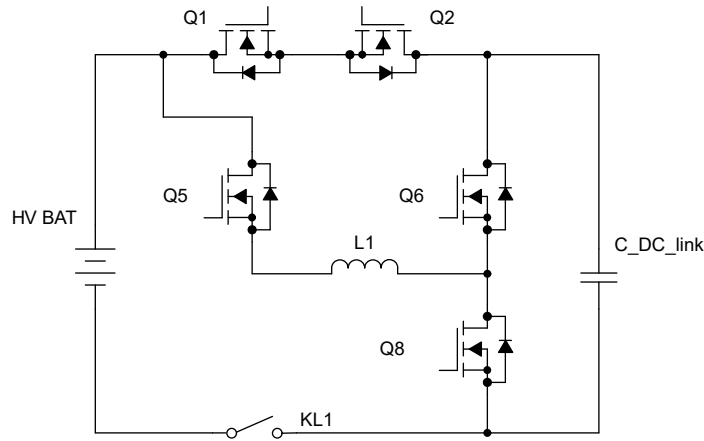


図 3-13. 統合プリチャージ設計のブロック図 2

この統合型設計は、システムレベルの方法を示しています。DC リンク コンデンサのプリチャージと HV_BAT のヒーティングを実現するには、マイコンが不可欠です。さらに、各種の絶縁型または非絶縁型のドライバが必要です。双方向 FET Q1/Q2 について、双方向 GaN LMG3660-Q1 を置き換えることができます。この統合型設計で使用されている主な TI コンポーネントの一覧を、マイコン、ドライバ、センサを含めて表 3-3 に示します。

表 3-3. TI 部品

	部品番号	仕様
MCU	F29H859TU-Q1	C2000 シリーズ
ローサイドドライバ	UCC27524A-Q1	2 チャネル
ローサイドドライバ	UCC27518A-Q1	1 チャネル
絶縁型ドライバ	UCC21351-Q1	基本絶縁型

表 3-3. TI 部品 (続き)

	部品番号	仕様
絶縁型ドライバ	UCC21551-Q1	強化絶縁型
絶縁型ドライバ	UCC5350L-Q1	強化絶縁型
ホール センサ	TMCS1133-Q1	CT の代替品
双方向 GaN	LMG3660-Q1	

4 まとめ

このアプリケーション ノートでは、DC リンク コンデンサをプリチャージするための 7 つの異なる設計を分析しました。従来型の設計は大きなパワー抵抗を使用するのが特徴で、電力密度が最も小さいのに対して、双方向 HV-LV DCDC は最大の電力密度を達成できます。部品表 (BOM) コストについても、従来型の設計が最も高価になります。BOM コスト、電力密度、電力損失などの各種パラメータについて、それぞれの設計の包括的な比較を表 4-1 に示します。

表 4-1. プリチャージの設計

設計	元の回路	絶縁型スイッチ ドライバ	アクティブ プリチャージ コントローラ	ディスクリート HV 降圧	独立した絶縁型 DCDC	双方向 HV-LV DCDC	統合型プリチャージ
Bom コスト	高	高	中	中	高	低	中
電力密度	低	低	中	中	中	高	高
電力損失	高	高	低	低	低	低	低

5 用語

HEV/EV - ハイブリッド電気自動車と電気自動車

HV - 高電圧

PCC - プリチャージ コンタクタ

EMR - 電気機械リレー

MCP - メイン コンタクタの正電圧

MCN - メイン コンタクタの負電圧

SSR - ソリッド ステートリレー

6 参考資料

1. テキサス・インスツルメンツ、『高電圧システムでプリチャージ回路が必要な理由』、アプリケーション ブリーフ
2. テキサス・インスツルメンツ、『TIDA-050080: 過電流保護機能搭載、高電圧パッシブ プリチャージのリファレンス デザイン』、リファレンス デザイン
3. テキサス・インスツルメンツ、『TPSI31P1-Q1 17V 絶縁型ゲートドライバとバイアス電源搭載、車載用アクティブ プリチャージコントローラ』、データシート
4. テキサス インスツルメンツ、TPSI31P1-CALC、計算ツール
5. テキサス・インスツルメンツ、『LM25037-Q1 デュアル モード PWM コントローラ、交流出力付きデータシート』、データシート
6. テキサス・インスツルメンツ、PMP41078、製品ページ

7 改訂履歴

Changes from Revision * (October 2025) to Revision A (April 2026)	Page
• アイソレータの部品番号を更新し、ハイパーリンクを追加.....	10

STANDARD TERMS FOR EVALUATION MODULES

1. *Delivery:* TI delivers TI evaluation boards, kits, or modules, including any accompanying demonstration software, components, and/or documentation which may be provided together or separately (collectively, an "EVM" or "EVMs") to the User ("User") in accordance with the terms set forth herein. User's acceptance of the EVM is expressly subject to the following terms.
 - 1.1 EVMs are intended solely for product or software developers for use in a research and development setting to facilitate feasibility evaluation, experimentation, or scientific analysis of TI semiconductors products. EVMs have no direct function and are not finished products. EVMs shall not be directly or indirectly assembled as a part or subassembly in any finished product. For clarification, any software or software tools provided with the EVM ("Software") shall not be subject to the terms and conditions set forth herein but rather shall be subject to the applicable terms that accompany such Software
 - 1.2 EVMs are not intended for consumer or household use. EVMs may not be sold, sublicensed, leased, rented, loaned, assigned, or otherwise distributed for commercial purposes by Users, in whole or in part, or used in any finished product or production system.
2. *Limited Warranty and Related Remedies/Disclaimers:*
 - 2.1 These terms do not apply to Software. The warranty, if any, for Software is covered in the applicable Software License Agreement.
 - 2.2 TI warrants that the TI EVM will conform to TI's published specifications for ninety (90) days after the date TI delivers such EVM to User. Notwithstanding the foregoing, TI shall not be liable for a nonconforming EVM if (a) the nonconformity was caused by neglect, misuse or mistreatment by an entity other than TI, including improper installation or testing, or for any EVMs that have been altered or modified in any way by an entity other than TI, (b) the nonconformity resulted from User's design, specifications or instructions for such EVMs or improper system design, or (c) User has not paid on time. Testing and other quality control techniques are used to the extent TI deems necessary. TI does not test all parameters of each EVM. User's claims against TI under this Section 2 are void if User fails to notify TI of any apparent defects in the EVMs within ten (10) business days after delivery, or of any hidden defects with ten (10) business days after the defect has been detected.
 - 2.3 TI's sole liability shall be at its option to repair or replace EVMs that fail to conform to the warranty set forth above, or credit User's account for such EVM. TI's liability under this warranty shall be limited to EVMs that are returned during the warranty period to the address designated by TI and that are determined by TI not to conform to such warranty. If TI elects to repair or replace such EVM, TI shall have a reasonable time to repair such EVM or provide replacements. Repaired EVMs shall be warranted for the remainder of the original warranty period. Replaced EVMs shall be warranted for a new full ninety (90) day warranty period.

WARNING

Evaluation Kits are intended solely for use by technically qualified, professional electronics experts who are familiar with the dangers and application risks associated with handling electrical mechanical components, systems, and subsystems.

User shall operate the Evaluation Kit within TI's recommended guidelines and any applicable legal or environmental requirements as well as reasonable and customary safeguards. Failure to set up and/or operate the Evaluation Kit within TI's recommended guidelines may result in personal injury or death or property damage. Proper set up entails following TI's instructions for electrical ratings of interface circuits such as input, output and electrical loads.

NOTE:

EXPOSURE TO ELECTROSTATIC DISCHARGE (ESD) MAY CAUSE DEGRADATION OR FAILURE OF THE EVALUATION KIT; TI RECOMMENDS STORAGE OF THE EVALUATION KIT IN A PROTECTIVE ESD BAG.

3 Regulatory Notices:

3.1 United States

3.1.1 Notice applicable to EVMs not FCC-Approved:

FCC NOTICE: This kit is designed to allow product developers to evaluate electronic components, circuitry, or software associated with the kit to determine whether to incorporate such items in a finished product and software developers to write software applications for use with the end product. This kit is not a finished product and when assembled may not be resold or otherwise marketed unless all required FCC equipment authorizations are first obtained. Operation is subject to the condition that this product not cause harmful interference to licensed radio stations and that this product accept harmful interference. Unless the assembled kit is designed to operate under part 15, part 18 or part 95 of this chapter, the operator of the kit must operate under the authority of an FCC license holder or must secure an experimental authorization under part 5 of this chapter.

3.1.2 For EVMs annotated as FCC – FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION Part 15 Compliant:

CAUTION

This device complies with part 15 of the FCC Rules. Operation is subject to the following two conditions: (1) This device may not cause harmful interference, and (2) this device must accept any interference received, including interference that may cause undesired operation.

Changes or modifications not expressly approved by the party responsible for compliance could void the user's authority to operate the equipment.

FCC Interference Statement for Class A EVM devices

NOTE: This equipment has been tested and found to comply with the limits for a Class A digital device, pursuant to part 15 of the FCC Rules. These limits are designed to provide reasonable protection against harmful interference when the equipment is operated in a commercial environment. This equipment generates, uses, and can radiate radio frequency energy and, if not installed and used in accordance with the instruction manual, may cause harmful interference to radio communications. Operation of this equipment in a residential area is likely to cause harmful interference in which case the user will be required to correct the interference at his own expense.

FCC Interference Statement for Class B EVM devices

NOTE: This equipment has been tested and found to comply with the limits for a Class B digital device, pursuant to part 15 of the FCC Rules. These limits are designed to provide reasonable protection against harmful interference in a residential installation. This equipment generates, uses and can radiate radio frequency energy and, if not installed and used in accordance with the instructions, may cause harmful interference to radio communications. However, there is no guarantee that interference will not occur in a particular installation. If this equipment does cause harmful interference to radio or television reception, which can be determined by turning the equipment off and on, the user is encouraged to try to correct the interference by one or more of the following measures:

- Reorient or relocate the receiving antenna.
- Increase the separation between the equipment and receiver.
- Connect the equipment into an outlet on a circuit different from that to which the receiver is connected.
- Consult the dealer or an experienced radio/TV technician for help.

3.2 Canada

3.2.1 For EVMs issued with an Industry Canada Certificate of Conformance to RSS-210 or RSS-247

Concerning EVMs Including Radio Transmitters:

This device complies with Industry Canada license-exempt RSSs. Operation is subject to the following two conditions:

(1) this device may not cause interference, and (2) this device must accept any interference, including interference that may cause undesired operation of the device.

Concernant les EVMs avec appareils radio:

Le présent appareil est conforme aux CNR d'Industrie Canada applicables aux appareils radio exempts de licence. L'exploitation est autorisée aux deux conditions suivantes: (1) l'appareil ne doit pas produire de brouillage, et (2) l'utilisateur de l'appareil doit accepter tout brouillage radioélectrique subi, même si le brouillage est susceptible d'en compromettre le fonctionnement.

Concerning EVMs Including Detachable Antennas:

Under Industry Canada regulations, this radio transmitter may only operate using an antenna of a type and maximum (or lesser) gain approved for the transmitter by Industry Canada. To reduce potential radio interference to other users, the antenna type and its gain should be so chosen that the equivalent isotropically radiated power (e.i.r.p.) is not more than that necessary for successful communication. This radio transmitter has been approved by Industry Canada to operate with the antenna types listed in the user guide with the maximum permissible gain and required antenna impedance for each antenna type indicated. Antenna types not included in this list, having a gain greater than the maximum gain indicated for that type, are strictly prohibited for use with this device.

Concernant les EVMs avec antennes détachables

Conformément à la réglementation d'Industrie Canada, le présent émetteur radio peut fonctionner avec une antenne d'un type et d'un gain maximal (ou inférieur) approuvé pour l'émetteur par Industrie Canada. Dans le but de réduire les risques de brouillage radioélectrique à l'intention des autres utilisateurs, il faut choisir le type d'antenne et son gain de sorte que la puissance isotrope rayonnée équivalente (p.i.r.e.) ne dépasse pas l'intensité nécessaire à l'établissement d'une communication satisfaisante. Le présent émetteur radio a été approuvé par Industrie Canada pour fonctionner avec les types d'antenne énumérés dans le manuel d'usage et ayant un gain admissible maximal et l'impédance requise pour chaque type d'antenne. Les types d'antenne non inclus dans cette liste, ou dont le gain est supérieur au gain maximal indiqué, sont strictement interdits pour l'exploitation de l'émetteur.

3.3 Japan

3.3.1 *Notice for EVMs delivered in Japan:* Please see http://www.tij.co.jp/llds/ti_ja/general/eStore/notice_01.page 日本国内に輸入される評価用キット、ボードについては、次のところをご覧ください。

<https://www.ti.com/ja-jp/legal/notice-for-evaluation-kits-delivered-in-japan.html>

3.3.2 *Notice for Users of EVMs Considered "Radio Frequency Products" in Japan:* EVMs entering Japan may not be certified by TI as conforming to Technical Regulations of Radio Law of Japan.

If User uses EVMs in Japan, not certified to Technical Regulations of Radio Law of Japan, User is required to follow the instructions set forth by Radio Law of Japan, which includes, but is not limited to, the instructions below with respect to EVMs (which for the avoidance of doubt are stated strictly for convenience and should be verified by User):

1. Use EVMs in a shielded room or any other test facility as defined in the notification #173 issued by Ministry of Internal Affairs and Communications on March 28, 2006, based on Sub-section 1.1 of Article 6 of the Ministry's Rule for Enforcement of Radio Law of Japan,
2. Use EVMs only after User obtains the license of Test Radio Station as provided in Radio Law of Japan with respect to EVMs, or
3. Use of EVMs only after User obtains the Technical Regulations Conformity Certification as provided in Radio Law of Japan with respect to EVMs. Also, do not transfer EVMs, unless User gives the same notice above to the transferee. Please note that if User does not follow the instructions above, User will be subject to penalties of Radio Law of Japan.

【無線電波を送信する製品の開発キットをお使いになる際の注意事項】 開発キットの中には技術基準適合証明を受けていないものがあります。技術適合証明を受けていないものご使用に際しては、電波法遵守のため、以下のいずれかの措置を取っていただく必要がありますのでご注意ください。

1. 電波法施行規則第6条第1項第1号に基づく平成18年3月28日総務省告示第173号で定められた電波暗室等の試験設備でご使用いただく。
2. 実験局の免許を取得後ご使用いただく。
3. 技術基準適合証明を取得後ご使用いただく。

なお、本製品は、上記の「ご使用にあたっての注意」を譲渡先、移転先に通知しない限り、譲渡、移転できないものとします。

上記を遵守頂けない場合は、電波法の罰則が適用される可能性があることをご留意ください。日本テキサス・イ

ンスツルメンツ株式会社

東京都新宿区西新宿 6 丁目 2 4 番 1 号

西新宿三井ビル

3.3.3 *Notice for EVMs for Power Line Communication:* Please see http://www.tij.co.jp/llds/ti_ja/general/eStore/notice_02.page

電力線搬送波通信についての開発キットをお使いになる際の注意事項については、次のところをご覧ください。 <https://www.ti.com/ja-jp/legal/notice-for-evaluation-kits-for-power-line-communication.html>

3.4 European Union

3.4.1 *For EVMs subject to EU Directive 2014/30/EU (Electromagnetic Compatibility Directive):*

This is a class A product intended for use in environments other than domestic environments that are connected to a low-voltage power-supply network that supplies buildings used for domestic purposes. In a domestic environment this product may cause radio interference in which case the user may be required to take adequate measures.

-
- 4 *EVM Use Restrictions and Warnings:*
 - 4.1 EVMS ARE NOT FOR USE IN FUNCTIONAL SAFETY AND/OR SAFETY CRITICAL EVALUATIONS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO EVALUATIONS OF LIFE SUPPORT APPLICATIONS.
 - 4.2 User must read and apply the user guide and other available documentation provided by TI regarding the EVM prior to handling or using the EVM, including without limitation any warning or restriction notices. The notices contain important safety information related to, for example, temperatures and voltages.
 - 4.3 *Safety-Related Warnings and Restrictions:*
 - 4.3.1 User shall operate the EVM within TI's recommended specifications and environmental considerations stated in the user guide, other available documentation provided by TI, and any other applicable requirements and employ reasonable and customary safeguards. Exceeding the specified performance ratings and specifications (including but not limited to input and output voltage, current, power, and environmental ranges) for the EVM may cause personal injury or death, or property damage. If there are questions concerning performance ratings and specifications, User should contact a TI field representative prior to connecting interface electronics including input power and intended loads. Any loads applied outside of the specified output range may also result in unintended and/or inaccurate operation and/or possible permanent damage to the EVM and/or interface electronics. Please consult the EVM user guide prior to connecting any load to the EVM output. If there is uncertainty as to the load specification, please contact a TI field representative. During normal operation, even with the inputs and outputs kept within the specified allowable ranges, some circuit components may have elevated case temperatures. These components include but are not limited to linear regulators, switching transistors, pass transistors, current sense resistors, and heat sinks, which can be identified using the information in the associated documentation. When working with the EVM, please be aware that the EVM may become very warm.
 - 4.3.2 EVMs are intended solely for use by technically qualified, professional electronics experts who are familiar with the dangers and application risks associated with handling electrical mechanical components, systems, and subsystems. User assumes all responsibility and liability for proper and safe handling and use of the EVM by User or its employees, affiliates, contractors or designees. User assumes all responsibility and liability to ensure that any interfaces (electronic and/or mechanical) between the EVM and any human body are designed with suitable isolation and means to safely limit accessible leakage currents to minimize the risk of electrical shock hazard. User assumes all responsibility and liability for any improper or unsafe handling or use of the EVM by User or its employees, affiliates, contractors or designees.
 - 4.4 User assumes all responsibility and liability to determine whether the EVM is subject to any applicable international, federal, state, or local laws and regulations related to User's handling and use of the EVM and, if applicable, User assumes all responsibility and liability for compliance in all respects with such laws and regulations. User assumes all responsibility and liability for proper disposal and recycling of the EVM consistent with all applicable international, federal, state, and local requirements.
 5. *Accuracy of Information:* To the extent TI provides information on the availability and function of EVMs, TI attempts to be as accurate as possible. However, TI does not warrant the accuracy of EVM descriptions, EVM availability or other information on its websites as accurate, complete, reliable, current, or error-free.
 6. *Disclaimers:*
 - 6.1 EXCEPT AS SET FORTH ABOVE, EVMS AND ANY MATERIALS PROVIDED WITH THE EVM (INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, REFERENCE DESIGNS AND THE DESIGN OF THE EVM ITSELF) ARE PROVIDED "AS IS" AND "WITH ALL FAULTS." TI DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING SUCH ITEMS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY EPIDEMIC FAILURE WARRANTY OR IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF ANY THIRD PARTY PATENTS, COPYRIGHTS, TRADE SECRETS OR OTHER INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.
 - 6.2 EXCEPT FOR THE LIMITED RIGHT TO USE THE EVM SET FORTH HEREIN, NOTHING IN THESE TERMS SHALL BE CONSTRUED AS GRANTING OR CONFERRING ANY RIGHTS BY LICENSE, PATENT, OR ANY OTHER INDUSTRIAL OR INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT OF TI, ITS SUPPLIERS/LICENSORS OR ANY OTHER THIRD PARTY, TO USE THE EVM IN ANY FINISHED END-USER OR READY-TO-USE FINAL PRODUCT, OR FOR ANY INVENTION, DISCOVERY OR IMPROVEMENT, REGARDLESS OF WHEN MADE, CONCEIVED OR ACQUIRED.
 7. *USER'S INDEMNITY OBLIGATIONS AND REPRESENTATIONS.* USER WILL DEFEND, INDEMNIFY AND HOLD TI, ITS LICENSORS AND THEIR REPRESENTATIVES HARMLESS FROM AND AGAINST ANY AND ALL CLAIMS, DAMAGES, LOSSES, EXPENSES, COSTS AND LIABILITIES (COLLECTIVELY, "CLAIMS") ARISING OUT OF OR IN CONNECTION WITH ANY HANDLING OR USE OF THE EVM THAT IS NOT IN ACCORDANCE WITH THESE TERMS. THIS OBLIGATION SHALL APPLY WHETHER CLAIMS ARISE UNDER STATUTE, REGULATION, OR THE LAW OF TORT, CONTRACT OR ANY OTHER LEGAL THEORY, AND EVEN IF THE EVM FAILS TO PERFORM AS DESCRIBED OR EXPECTED.
-

8. *Limitations on Damages and Liability:*

8.1 *General Limitations.* IN NO EVENT SHALL TI BE LIABLE FOR ANY SPECIAL, COLLATERAL, INDIRECT, PUNITIVE, INCIDENTAL, CONSEQUENTIAL, OR EXEMPLARY DAMAGES IN CONNECTION WITH OR ARISING OUT OF THESE TERMS OR THE USE OF THE EVMS , REGARDLESS OF WHETHER TI HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES. EXCLUDED DAMAGES INCLUDE, BUT ARE NOT LIMITED TO, COST OF REMOVAL OR REINSTALLATION, ANCILLARY COSTS TO THE PROCUREMENT OF SUBSTITUTE GOODS OR SERVICES, RETESTING, OUTSIDE COMPUTER TIME, LABOR COSTS, LOSS OF GOODWILL, LOSS OF PROFITS, LOSS OF SAVINGS, LOSS OF USE, LOSS OF DATA, OR BUSINESS INTERRUPTION. NO CLAIM, SUIT OR ACTION SHALL BE BROUGHT AGAINST TI MORE THAN TWELVE (12) MONTHS AFTER THE EVENT THAT GAVE RISE TO THE CAUSE OF ACTION HAS OCCURRED.

8.2 *Specific Limitations.* IN NO EVENT SHALL TI'S AGGREGATE LIABILITY FROM ANY USE OF AN EVM PROVIDED HEREUNDER, INCLUDING FROM ANY WARRANTY, INDEMNITY OR OTHER OBLIGATION ARISING OUT OF OR IN CONNECTION WITH THESE TERMS, , EXCEED THE TOTAL AMOUNT PAID TO TI BY USER FOR THE PARTICULAR EVM(S) AT ISSUE DURING THE PRIOR TWELVE (12) MONTHS WITH RESPECT TO WHICH LOSSES OR DAMAGES ARE CLAIMED. THE EXISTENCE OF MORE THAN ONE CLAIM SHALL NOT ENLARGE OR EXTEND THIS LIMIT.

9. *Return Policy.* Except as otherwise provided, TI does not offer any refunds, returns, or exchanges. Furthermore, no return of EVM(s) will be accepted if the package has been opened and no return of the EVM(s) will be accepted if they are damaged or otherwise not in a resalable condition. If User feels it has been incorrectly charged for the EVM(s) it ordered or that delivery violates the applicable order, User should contact TI. All refunds will be made in full within thirty (30) working days from the return of the components(s), excluding any postage or packaging costs.

10. *Governing Law:* These terms and conditions shall be governed by and interpreted in accordance with the laws of the State of Texas, without reference to conflict-of-laws principles. User agrees that non-exclusive jurisdiction for any dispute arising out of or relating to these terms and conditions lies within courts located in the State of Texas and consents to venue in Dallas County, Texas. Notwithstanding the foregoing, any judgment may be enforced in any United States or foreign court, and TI may seek injunctive relief in any United States or foreign court.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2023, Texas Instruments Incorporated

重要なお知らせと免責事項

TI は、技術データと信頼性データ (データシートを含みます)、設計リソース (リファレンス デザインを含みます)、アプリケーションや設計に関する各種アドバイス、Web ツール、安全性情報、その他のリソースを、欠陥が存在する可能性のある「現状のまま」提供しており、商品性および特定目的に対する適合性の黙示保証、第三者の知的財産権の非侵害保証を含むいかなる保証も、明示的または黙示的にかかわらず拒否します。

これらのリソースは、TI 製品を使用する設計の経験を積んだ開発者への提供を意図したものです。(1) お客様のアプリケーションに適した TI 製品の選定、(2) お客様のアプリケーションの設計、検証、試験、(3) お客様のアプリケーションに該当する各種規格や、その他のあらゆる安全性、セキュリティ、規制、または他の要件への確実な適合に関する責任を、お客様のみが単独で負うものとし、

上記の各種リソースは、予告なく変更される可能性があります。これらのリソースは、リソースで説明されている TI 製品を使用するアプリケーションの開発の目的でのみ、TI はその使用をお客様に許諾します。これらのリソースに関して、他の目的で複製することや掲載することは禁止されています。TI や第三者の知的財産権のライセンスが付与されている訳ではありません。お客様は、これらのリソースを自身で使用した結果発生するあらゆる申し立て、損害、費用、損失、責任について、TI およびその代理人を完全に補償するものとし、TI は一切の責任を拒否します。

TI の製品は、[TI の販売条件](#)、[TI の総合的な品質ガイドライン](#)、[ti.com](#) または TI 製品などに関連して提供される他の適用条件に従い提供されます。TI がこれらのリソースを提供することは、適用される TI の保証または他の保証の放棄の拡大や変更を意味するものではありません。TI がカスタム、またはカスタマー仕様として明示的に指定していない限り、TI の製品は標準的なカタログに掲載される汎用機器です。

お客様がいかなる追加条項または代替条項を提案する場合も、TI はそれらに異議を唱え、拒否します。

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

最終更新日 : 2025 年 10 月