

# 30 kW SiC 絶縁型 DC-DC コンバータ評価用ボード



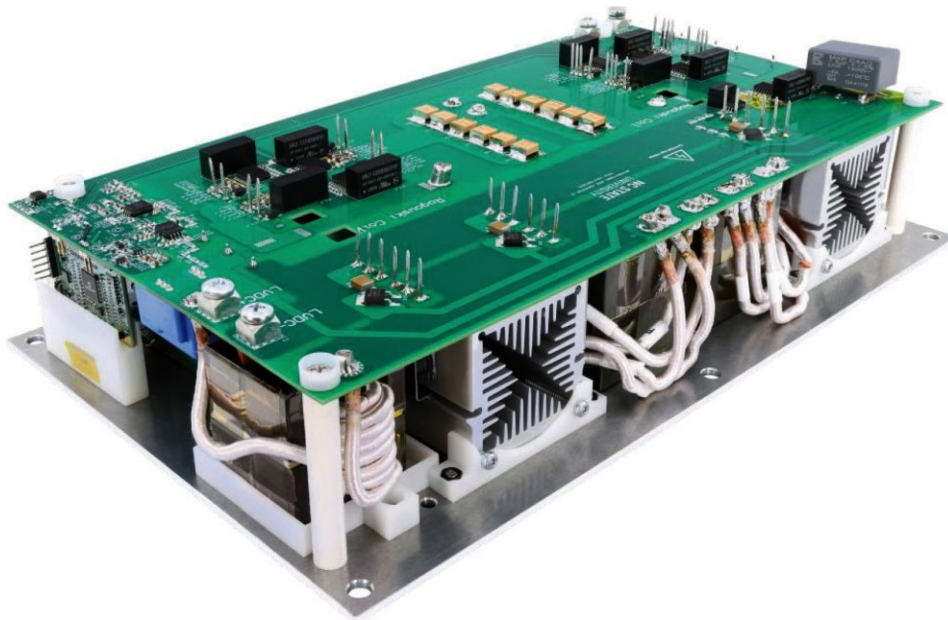
## はじめに

本書では、Microchip 社の 1200 V シリコンカーバイド(SiC) MOSFET およびダイオードを使った 30 kW 絶縁型 DC-DC コンバータの回路と性能について説明します。評価用ボードにより、SiC ベース絶縁型 DC-DC コンバータと Microchip 社製 MSC025SMA120B4 SiC ディスクリット MOSFET および MSC050SDA120BCT ダイオードの性能を評価する事ができます。

本評価用ボードは、ハイブリッド電気自動車(HEV)/電気自動車(EV)用充電モジュールおよび大電力スイッチング電源アプリケーション向けに設計された絶縁型 DC-DC 電力コンバータです。Microchip 社の 1200V SiC MOSFET と SiC ショットキー バリアダイオード(SBD)を使ったこのリファレンス デザインは、30 kW の出力電力で 98.5%の効率と 7.2 kW/L の電力密度を達成します。

図 1 に、30 kW DC-DC コンバータ評価用ボードを示します。

図 1. 30 kW SiC 絶縁型 DC-DC コンバータ評価用ボード



**Note:** 実際の製品は改良によって上図とは異なる場合があります。

### ⚠ 注意

この回路内の電圧は、人体が触れると重傷を負う危険性があるレベルに達します。感電の危険性のみならず、基板上の電圧、電流、電力レベルは不適切な使用によって火災の原因ともなります。適切な訓練を受けた有資格者のみが本回路を試験および操作できます。傷害および物的損害を防ぐため、必要かつ適切な手法を用いてください。

## 特長

評価用ボードが備えるハードウェアの主な特長は以下の通りです。

- 30 kW 絶縁型単方向 DC-DC コンバータ
- 入力電圧レンジ: DC 650~750 V
- 出力電圧レンジ: DC 150~650 V @ max. 60 A
- 高アバランシェ/ 反復 UIS (RUIS: Repetitive Unclamped Inductive Switching)定格を有する Microchip 社の次世代 1200V SiC MOSFET および 1200V/50A SiC カソードコモン デュアル SBD
- 高スイッチング周波数(140 kHz)による受動素子の小型化
- 7.2 kW/L の電力密度
- 98%を超えるピーク効率を達成し、幅広い出力レンジで高効率を維持
- dsPIC DSC による 3 レベルのデジタル変調制御
- 動作温度レンジ: -40~50 °C
- 安全性、電流ストレス、機械的ストレス、ノイズ耐性に配慮した IEC 規格に従うプリント基板(PCB)設計

## 応用例

本評価用ボードは以下への応用が可能です。

- 電気自動車の車載充電モジュール
- 産業用電源
- データセンター電源
- バッテリ バックアップ電源システム

# 目次

## はじめに

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 特長.....                      | 2  |
| 応用例.....                     | 2  |
| 1. 電氣的仕様.....                | 4  |
| 2. 評価用ボード.....               | 5  |
| 2.1. 回路と動作.....              | 5  |
| 2.2. 回路とプリント基板(PCB)の設計.....  | 11 |
| 2.3. 制御コードの実行処理.....         | 14 |
| 3. 電源投入/遮断手順.....            | 15 |
| 3.1. 電源投入手順.....             | 15 |
| 3.2. 電源遮断手順.....             | 16 |
| 4. 試験結果.....                 | 17 |
| 4.1. 電氣的性能.....              | 17 |
| 4.2. 効率.....                 | 22 |
| 4.3. 熱特性.....                | 24 |
| 5. 参考文書.....                 | 25 |
| 6. 改訂履歴.....                 | 26 |
| Microchip 社の情報.....          | 27 |
| Microchip 社ウェブサイト.....       | 27 |
| 製品変更通知サービス.....              | 27 |
| カスタマサポート.....                | 27 |
| Microchip 社のデバイスコード保護機能..... | 27 |
| 法律上の注意点.....                 | 27 |
| 商標.....                      | 28 |
| 品質管理システム.....                | 29 |
| 各国の営業所とサービス.....             | 30 |

1. 電氣的仕様

下表に本評価用ボードの電氣的仕様を示します。

表 1-1. 評価用ボードの電氣的仕様

| 記号            | パラメータ                                                    | 定格      | 単位        |
|---------------|----------------------------------------------------------|---------|-----------|
| $V_{in}$      | DC 入力電圧                                                  | 650~750 | V         |
| $I_{in}$      | DC 入力電流 (入力電圧 = DC 700 V、 $P_{OUT}$ = 30 kW)             | 44      | $A_{RMS}$ |
| $V_{out}$     | DC 出力電圧                                                  | 150~650 | V         |
| $I_{out}$     | DC 出力電流(最大)                                              | 60      | A         |
| $P_{out}$     | 出力電力                                                     | 30      | kW        |
| $E_{ff\_max}$ | ピーク効率 (条件: 入力電圧 = DC 700 V、出力電圧 = DC 650 V、出力電力 = 30 kW) | 98.2    | %         |
| $f_s$         | PWM スイッチング周波数                                            | 140     | kHz       |
| —             | バイアス電圧入力                                                 | 12/1    | V/A       |

## 2. 評価用ボード

以下では、評価用ボードの回路図、回路、プリント基板(PCB)レイアウトについて説明します。

### 2.1 回路と動作

以下では、回路と動作について説明します。

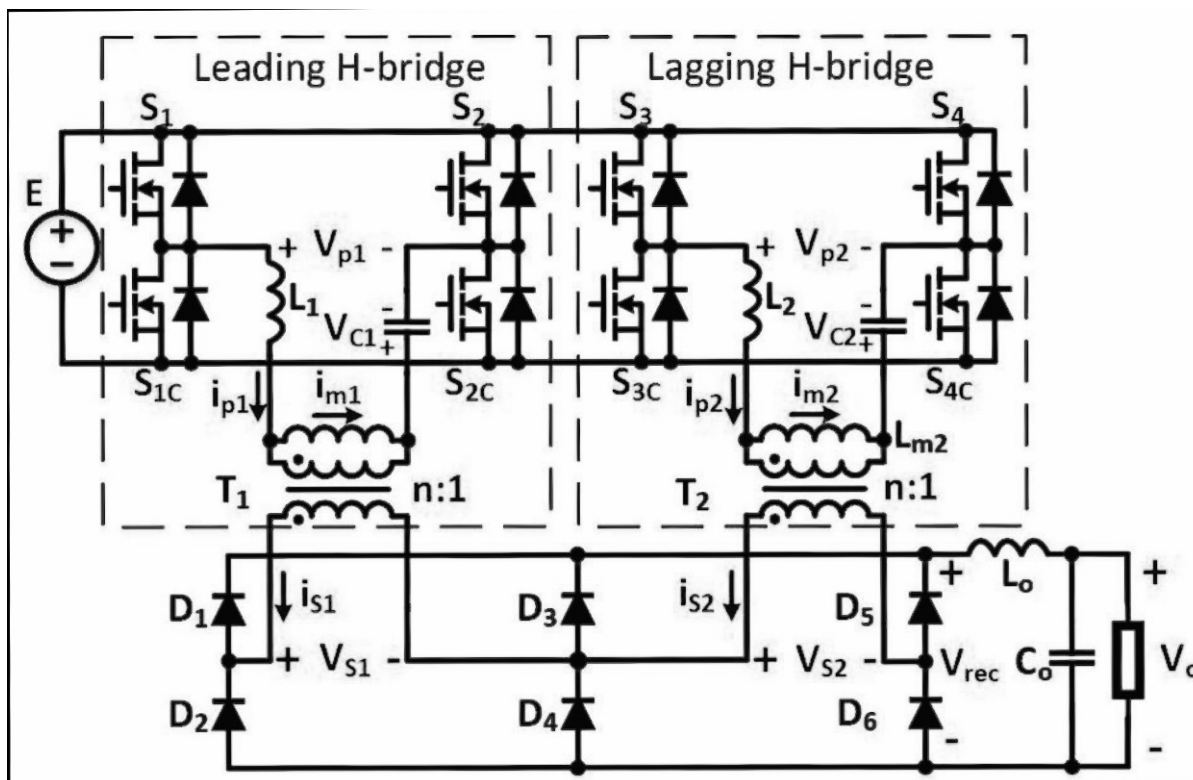
#### 2.1.1 一般的動作

一次側は 2 つの固定周波数フルブリッジ セクション(進み H ブリッジと遅れ H ブリッジ)で構成されます。各 H ブリッジ セクションは、入力と出力の動作条件に応じてフルブリッジまたはハーフブリッジとして動作できます。このような回路構成により、2 つの H ブリッジを 1 つのフルブリッジ コンバータ(進みおよび遅れ H ブリッジ間で位相をシフト)として動作させるか(図 2-2 参照)、各 H ブリッジをそれぞれハーフブリッジ コントローラ(2 つの H ブリッジ間で位相をシフト)として動作させる事ができます(図 2-3 参照)。さらに、1 つの H ブリッジ内の 2 つのハーフブリッジの間で位相をシフトする事も可能です(図 2-4 参照)。この回路構成により、本コンバータは全動作条件で 0 V スイッチング(ZVS)を維持しながら幅広い出力電圧レンジ(4:1)で動作可能です(環境条件にも依存)。

Microchip 社が提案するキャリアベースの変調方式を採用する事で、本コンバータは降圧型コンバータと同様の方法(出力電圧/電流のみを検出し、それらを比例-積分(PI)コントローラに inputs)で制御できます。出力電力は調整可能です。本コンバータは 2 つのモード (定電圧モード、定電流モード)で動作可能です。これらのモードは、制御ソフトウェアを使って設定します。

図 2-1 に、DC-DC コンバータ電源段の概略回路図を示します。

図 2-1. 電源段の概略回路図

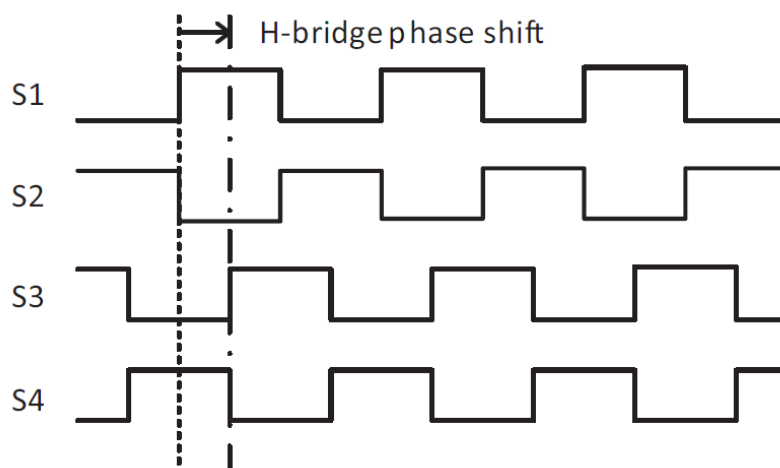


## 2.1.2 動作原理

本コンバータは 2 つの H ブリッジで構成され、各 H ブリッジは進み H ブリッジ モードまたは遅れ H ブリッジ モードで動作します。2 つの H ブリッジは同じスイッチング周波数と励磁電流振幅で動作します。S1 および S1c ゲート信号は、各 H ブリッジにおいてデッドタイムを伴う相補モードで動作します。内部回路の動作原理に関する詳細な動作解析と要約については、5. 「参考文書」内の IEEE® 参考文書を参照してください。

図 2-2 に、2 つの H ブリッジ間の位相シフトを示します。この位相シフトを制御する事により電力供給を制御します。

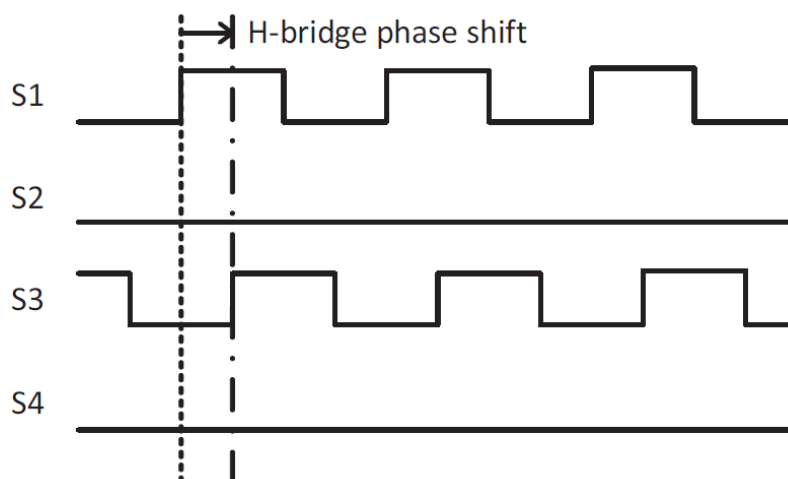
図 2-2. H ブリッジ動作モードの位相シフト



H ブリッジ位相シフト角が  $0^{\circ}$ ~ $180^{\circ}$  の範囲内である場合、出力電圧は H ブリッジ位相シフト角により制御されます。H ブリッジ位相シフト角が  $180^{\circ}$  に達した場合、出力電圧は以下の 2 通りの方法で制御できます。

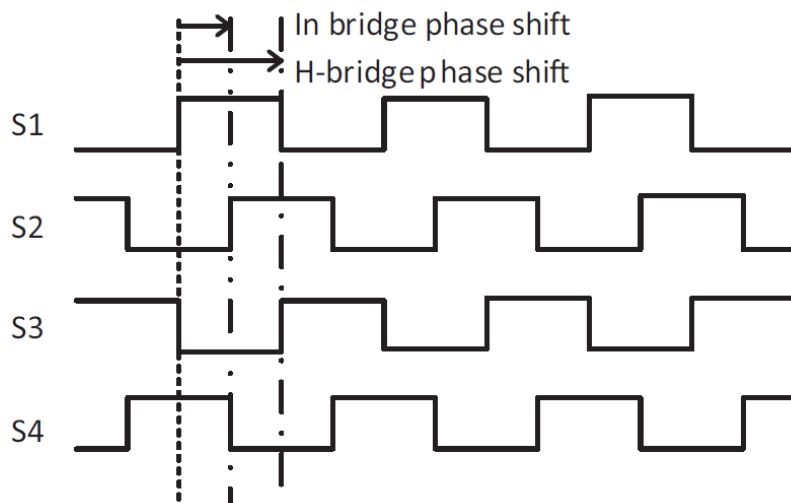
- 各 H ブリッジをハーフブリッジモードで動作させる事により電圧ゲインが  $1/2$  に減少し、H ブリッジ位相シフト角をさらに増加させる事ができます(図 2-3 参照)。この動作モードには、図 2-1 内に示された DC ブロッキング コンデンサが必要です。

図 2-3. ハーフブリッジ動作モードの位相シフト



- 各 H ブリッジの 2 相レグに位相シフトを追加する事で別自由度の変数を導入し、各 H ブリッジ相のゲインとコンバータ全体のゲインを制御します (図 2-4 参照)。

図 2-4. ブリッジ内位相シフトを追加した H ブリッジ動作モード



各モードの長所と短所については、5. 「参考文献」内の IEEE 参考文献を参照してください。コンバータ動作の詳細については、Microchip 社の技術サポート([www.microchip.com/sic](http://www.microchip.com/sic))にお問い合わせください。

### 2.1.3 変調と閉ループ制御

本評価用ボードには全部で 36 通りのスイッチング状態が存在します。制御と変調を簡素化するため、Microchip 社は図 2-5 に示すキャリアベース変調方式を提案します。この変調方式により、本コンバータは電圧が制御された電圧源としてモデル化でき、基本的には個々のケースで同じような制御方式が利用できます。このコンバータ システムは古典的な降圧型コンバータと同様の方法で制御されます。

図 2-5. キャリアベース変調方式の機能ブロック図

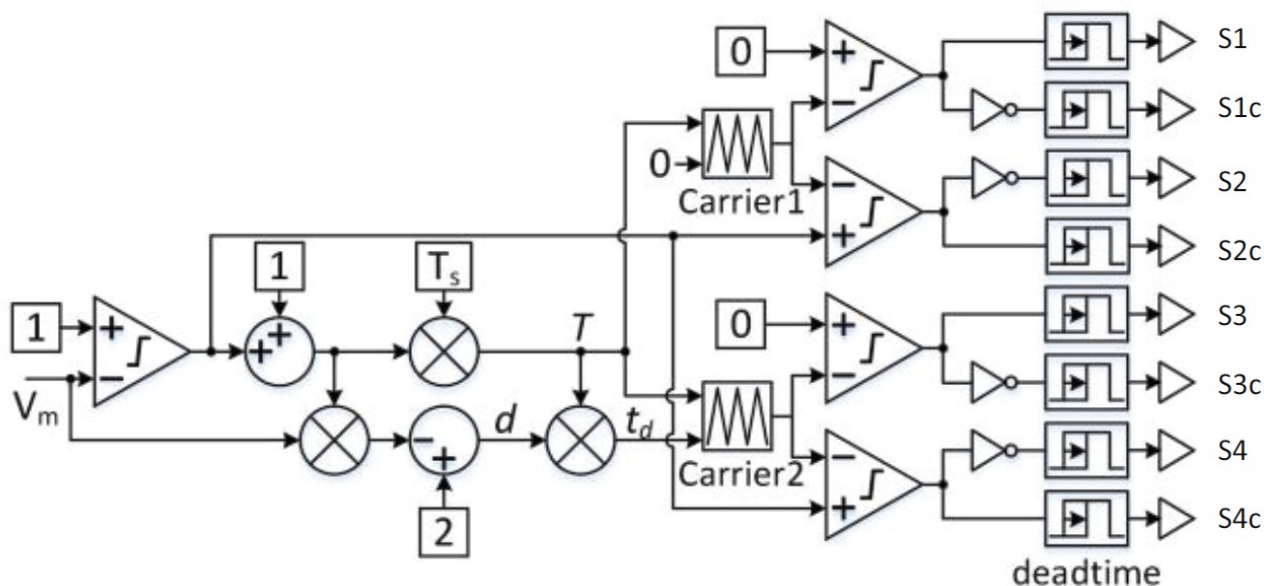
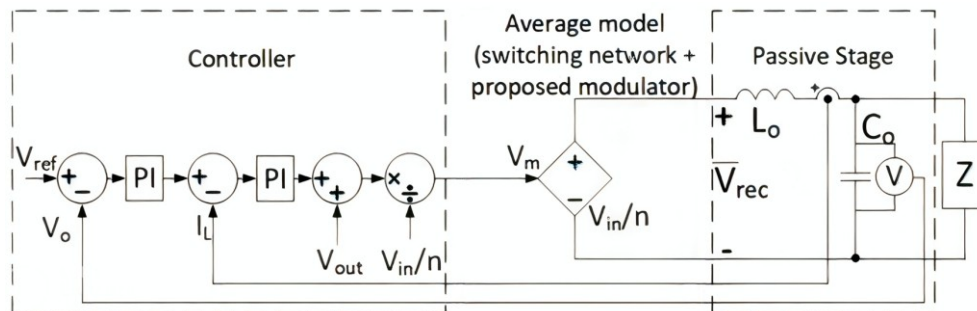


図 2-6 に、共通する 2 つのループ(電圧または電流による負帰還ループ)を含む制御ブロック図を示します。PI コントローラは、ユースケースに応じてコンバータを定電圧モードまたは定電流モードで制御します。



図 2-6. スイッチング回路とキャリアベース変調回路のアベレージモデルに基づく制御ブロック図



### 2.1.4 回路設計における注意事項

表 2-1 に、ハードウェア内の能動および受動部品の電圧/電流ストレスを示します。

詳細な設計手順と主要パラメータの計算式については、5. 「参考文献」内の IEEE 参考文献を参照してください。コンバータ回路と部品選定の詳細は、Microchip 社の技術サポート([www.microchip.com/sic](http://www.microchip.com/sic))にお問い合わせください。

表 2-1. 能動部品と受動部品の電圧/電流ストレス

| 部品                   | パラメータ       | 計算式                                                                                   | 値                      |
|----------------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| アクティブ スイッチ           | 電圧ストレス      | $V_{in}$                                                                              | 750 V                  |
|                      | 電流ストレス      | $I_o/n + I_{mpk}$                                                                     | 41 A                   |
|                      | RMS 電流      | $\frac{\sqrt{2}I_o}{2n} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left( \frac{nI_{mpk}}{I_o} \right)^2}$ | 22.7A                  |
| ダイオード                | 電圧ストレス      | D3, D4: $V_o/2D$ ; Others: $V_o/D$                                                    | D3, D4: 355 V、その他:710V |
|                      | 電流ストレス      | $I_o$                                                                                 | 60A                    |
|                      | RMS 電流      | $\sqrt{2}I_o/2$                                                                       | 42.4A                  |
| トランスおよび<br>組み込みインダクタ | 電圧ストレス(一次側) | $V_{in}/2$                                                                            | 750 V                  |
|                      | 電流ストレス(一次側) | $I_o/n + I_{mpk}$                                                                     | 41 A                   |
|                      | RMS 電流(一次側) | $\frac{I_o}{n} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left( \frac{nI_{mpk}}{I_o} \right)^2}$          | 32A                    |
| DC ブロッキング コンデンサ      | 電圧ストレス      | $V_{in}/2$                                                                            | 375V                   |
|                      | RMS 電流      | $\frac{I_o}{n} \sqrt{1 + \frac{1}{3} \left( \frac{nI_{mpk}}{I_o} \right)^2}$          | 32A                    |
| 出力インダクタ              | 電圧ストレス      | $2V_{in}/n$                                                                           | 750 V                  |
|                      | RMS 電流      | $I_o$                                                                                 | 60A                    |
| 出力コンデンサ              | 電圧ストレス      | $V_o$                                                                                 | 682V                   |
|                      | RMS 電流      | $\Delta i_{pk-pk}/2\sqrt{3}$                                                          | 3.5A                   |



## 2.1.5 トランスの設計

前述の回路は 2 つのトランス部品(T1 と T2)を使います。簡素化のために T1 と T2 に同じ部品を使う事はできますが、それでは回路構成の利点を完全に活かす事はできません。全ての動作モードにおける全ての条件下で ZVS を達成するために、遅れ H ブリッジは進み H ブリッジ内の S2 相(遅れ側の相)をアシストできます。これにより、トランス T1 を完全なインターリーブ巻き線として漏れインダクタンスを最小化する事により、性能を最適化できます。中～低負荷条件で ZVS を達成するために、遅れ H ブリッジ内の S4 相(遅れ側の相)はトランス T2 の漏れインダクタンス内のエネルギーを必要とするため、トランス T2 は漏れインダクタンスを考慮しながら設計する必要があります。

下表に、トランスの設計仕様とハードウェア パラメータの概要を示します。

**Note:** 電力分散と廃熱管理のために、各トランスは 2 つの小型トランスを使って実装し、それらの一次巻き線を直列に接続し、二次巻き線を並列に接続します。

表 2-2. トランスの設計仕様

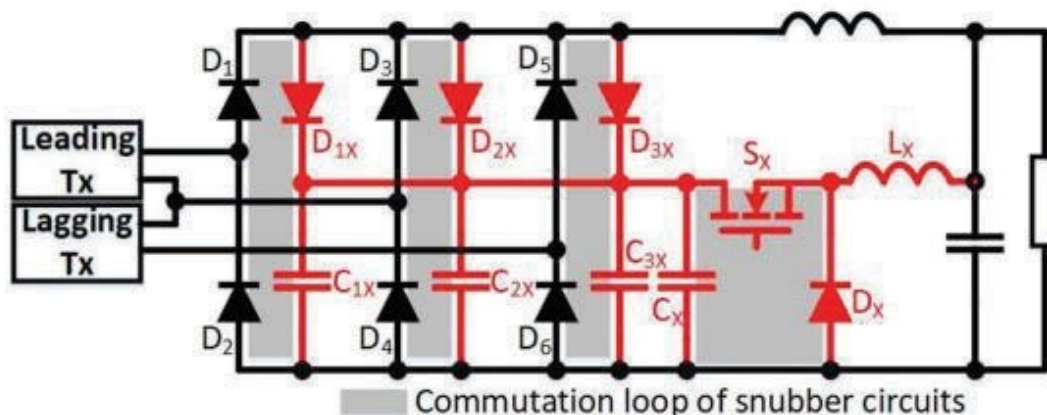
| パラメータ<br>記号         | 仕様                                                                                          | パラメータ                                                                                                                        | T <sub>X1/2</sub> 仕様                                                                                |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| V <sub>in</sub>     | 650～750 V                                                                                   | T <sub>1</sub> :<br>L <sub>k1</sub> : 1.1 μH<br>L <sub>m1</sub> : 110 μH<br>2 × T <sub>X1</sub> (一次側巻き線を直列、<br>二次側巻き線を並列に接続) | コア: PC95PQ65/54-Z<br>エアギャップ: 0.6 mm<br>巻き線: 7:7 完全インターリーブ                                           |
| V <sub>out</sub>    | 150～650 V                                                                                   |                                                                                                                              |                                                                                                     |
| I <sub>out</sub>    | 60 A                                                                                        |                                                                                                                              |                                                                                                     |
| f <sub>sw</sub>     | 140 kHz/70 kHz                                                                              |                                                                                                                              |                                                                                                     |
| S <sub>1-4(c)</sub> | 1200 V、25 mΩ                                                                                |                                                                                                                              |                                                                                                     |
| D <sub>1-6</sub>    | 1200 V、100 A                                                                                |                                                                                                                              |                                                                                                     |
| C <sub>o</sub>      | 1200 V、12 μF                                                                                |                                                                                                                              |                                                                                                     |
| C <sub>1/2</sub>    | 700 V、3 μF                                                                                  | T <sub>2</sub> :<br>L <sub>k2</sub> : 4.4 μH<br>L <sub>m2</sub> : 110 μH<br>2 × T <sub>X2</sub> (一次側巻き線を直列、<br>二次側巻き線を並列に接続) | コア: PC95PQ65/54-Z<br>エアギャップ: 0.6 mm<br>巻き線: 7:7 pri/shunt/sec<br>Magnetic shunt: 2 mm × 7 mm 180 μo |
| L <sub>o</sub>      | コア: E42/21/20 x2 セット<br>エアギャップ: 2.5 mm<br><br>巻き線: 14 巻き、<br>AWG44 x 4000 ストランドの<br>リッツ線を使用 |                                                                                                                              |                                                                                                     |

## 2.1.6 スナバ動作

将来の効率改善に向けて可能な限り単純な方法でエネルギーを再利用するために、二次側にある全てのパワー ダイオードがアクティブスナバ回路を共有します。入力電圧が調整された形の降圧回路を形成します。スイッチング周波数はメインスイッチよりも大幅に低下します。これらのダイオードを横切る電圧スパイクを最小化するため、各ダイオード ハーフブリッジは最小の整流ループで小容量のセラミック スナバ コンデンサ(0.1  $\mu\text{F}$ )と小さなクランピング ダイオード(2 A)を備えます。理想的には、クランプ後の入力電圧は整流後の電圧振幅より約 20%大きくなるように調整します。

図 2-7 に、最小の整流ループを持つアクティブスナバ回路を示します。

図 2-7. 最小の整流ループを持つアクティブ スナバ回路



**Note:** 上図にはアクティブスナバ回路を赤で示しています。

表 2-3 に、スナバ回路のパラメータを示します。

表 2-3. スナバ回路のパラメータ

| パラメータ                  | 定格                        |
|------------------------|---------------------------|
| $V_{in}$               | 800 V / 400 V             |
| $F_x$                  | 25 kHz                    |
| $D_{1x}/D_{2x}/D_{3x}$ | 1200 V, 2 A               |
| $C_x$                  | 1200 V, 1.1 $\mu\text{F}$ |
| $S_x$                  | 1200 V, 520 m $\Omega$    |
| $D_x$                  | 1200 V, 10 A              |
| $C_{1x}/C_{2x}/C_{3x}$ | 0.1 $\mu\text{F}$         |
| $L_x$                  | 610 $\mu\text{H}$         |

## 2.1.7 コントローラ、信号検出、保護

制御と変調のために Microchip 社の dsPIC33CK256MP506 固定小数点 DSC を使います。CAN (Controller Area Network) プロトコル コントローラとコンバータ コントローラからの物理的な 2 線 CAN バスの間のインターフェイスとして CAN FD (CAN with Flexible Data Rate) 対応の高速 CAN トランシーバ(ATA6561)を使います。閉ループ制御のために入力電圧、出力電圧、出力電流を検出してコントローラへフィードバックします。これらの信号は、入力/出力の低電圧および過電圧と出力の過電流からの保護用にも使います。

## 2.2 回路とプリント基板(PCB)の設計

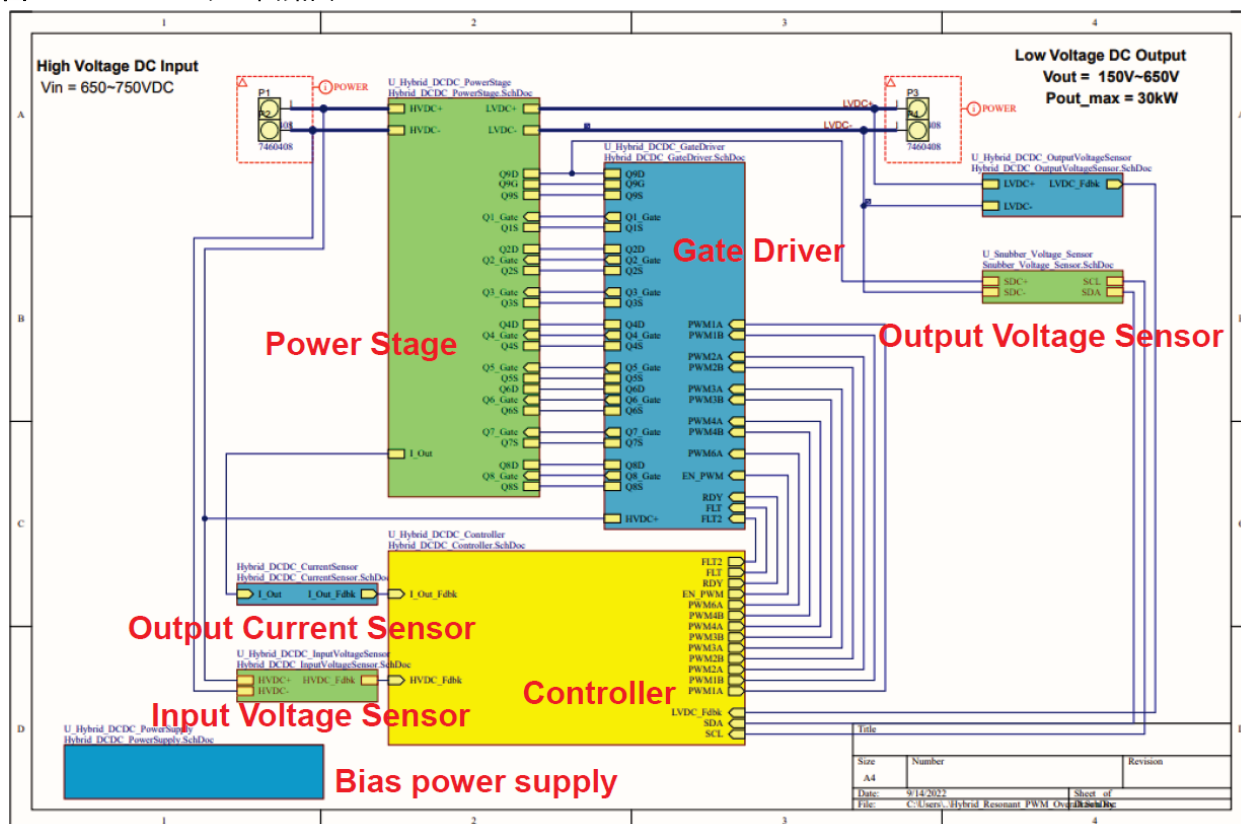
以下では、回路とプリント基板の設計について説明します。

### 2.2.1 回路設計

下図に、ハードウェア回路のブロックレベル回路図を示します。これには電源段(パワーデバイスと受動部品を含む)、ゲートドライバ、出力電圧センサ、出力電流センサ、入力電圧センサ、コントローラ、補助バイアス電源の回路が含まれます。

各回路部分の詳細な設計については、Microchip 社ウェブサイト([www.microchip.com/sic](http://www.microchip.com/sic))内のデザインパッケージを参照してください。

**図 2-8. コンバータの回路図**



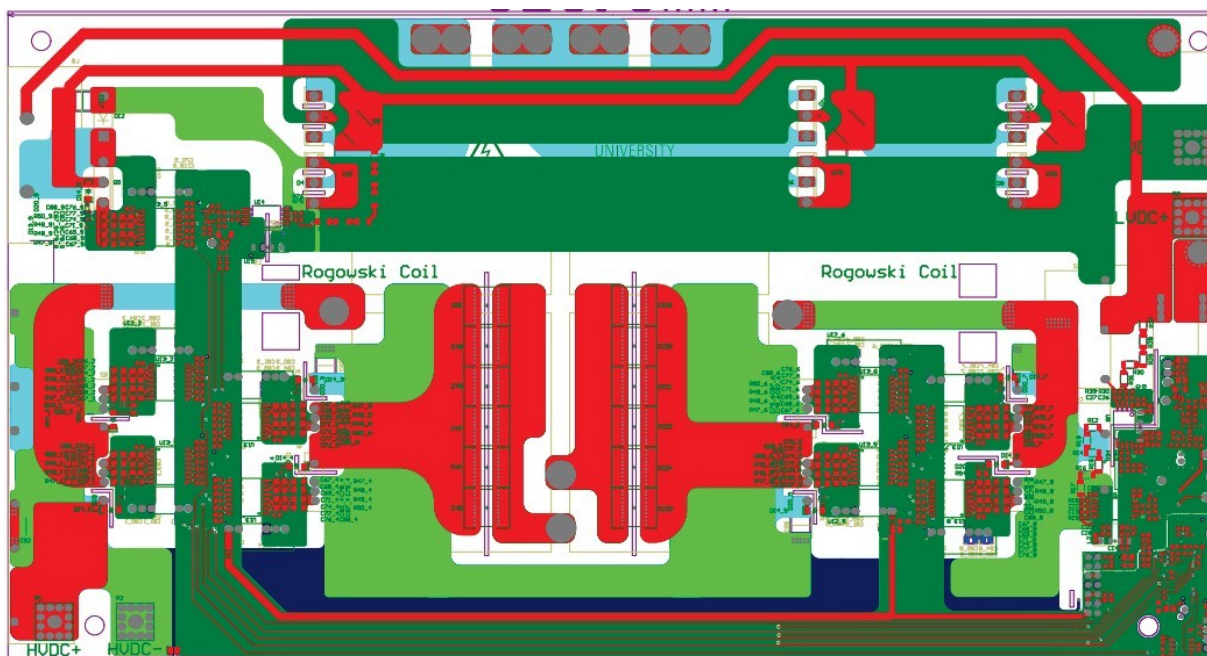
## 2.2.2 プリント基板(PCB)の設計

メイン PCB 基板は、寄生ループ インダクタンスを最小限に抑えるために 6 層 PCB 構造を利用して輻射磁束をキャンセルするように設計します。制御回路と電源回路は同じ基板上に実装されますが、相互作用を防ぐと共に電磁適合性(EMI)を確保するため、それぞれ分離された異なるセクション内に配置されます。

下図に、メイン基板のレイアウトを示します(6 層を重ねて表示)。メイン基板に加えて、コンデンサと補助制御電源を実装した 2 つのドータボードを使います。また、コントローラはソケットを介してメイン基板に接続します。

各基板層の詳細なレイアウトと各ドータボードの設計については、Microchip 社ウェブサイト ([www.microchip.com/sic](http://www.microchip.com/sic)) 内のデザインパッケージを参照してください。

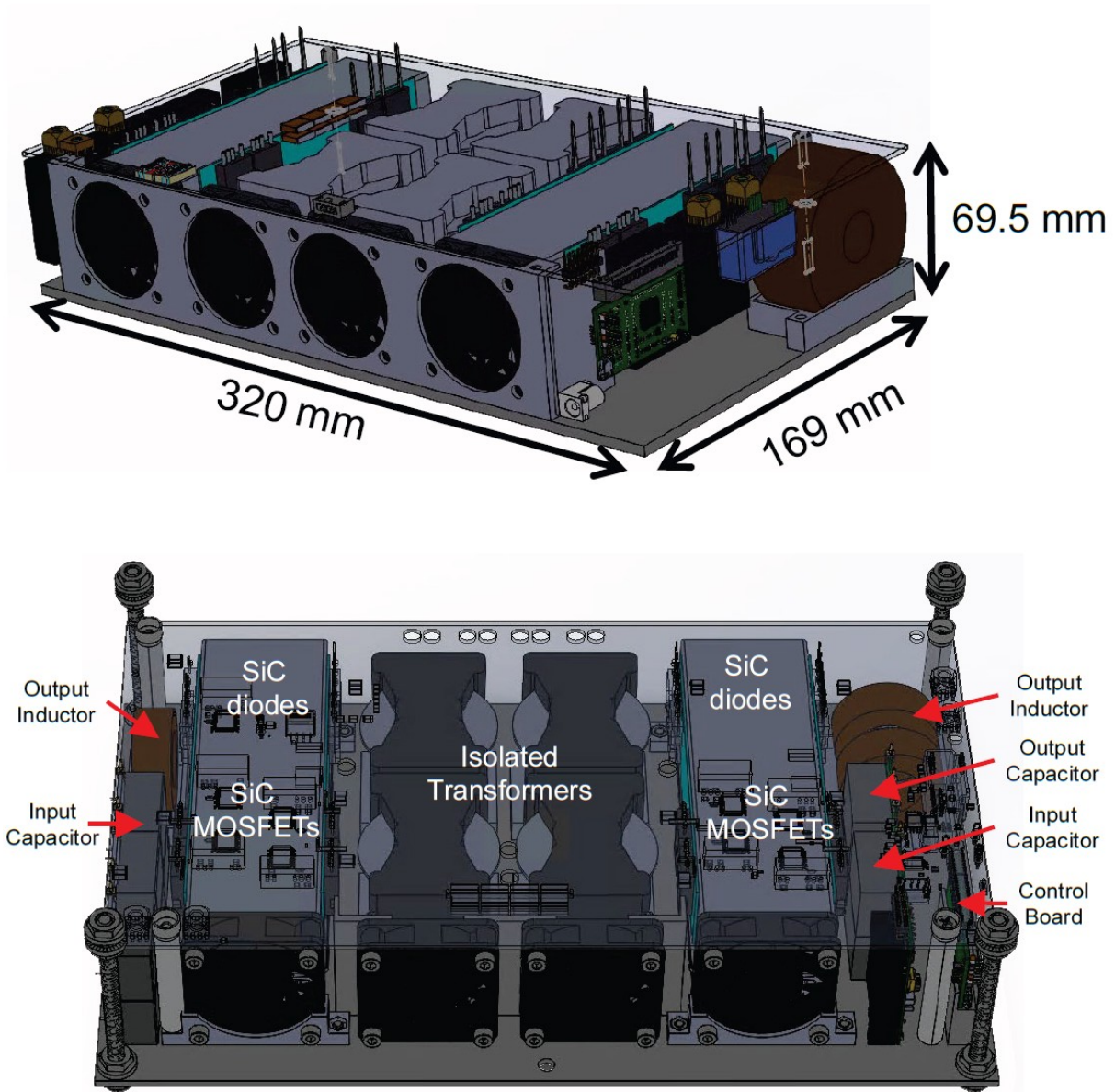
図 2-9. メイン基板のレイアウト



### 2.2.3 コンバータ アセンブリ

図 2-10 に、コンバータ アセンブリを示します。この回路は 7.2 kW/L の電力密度を達成します。

図 2-10. コンバータ アセンブリ





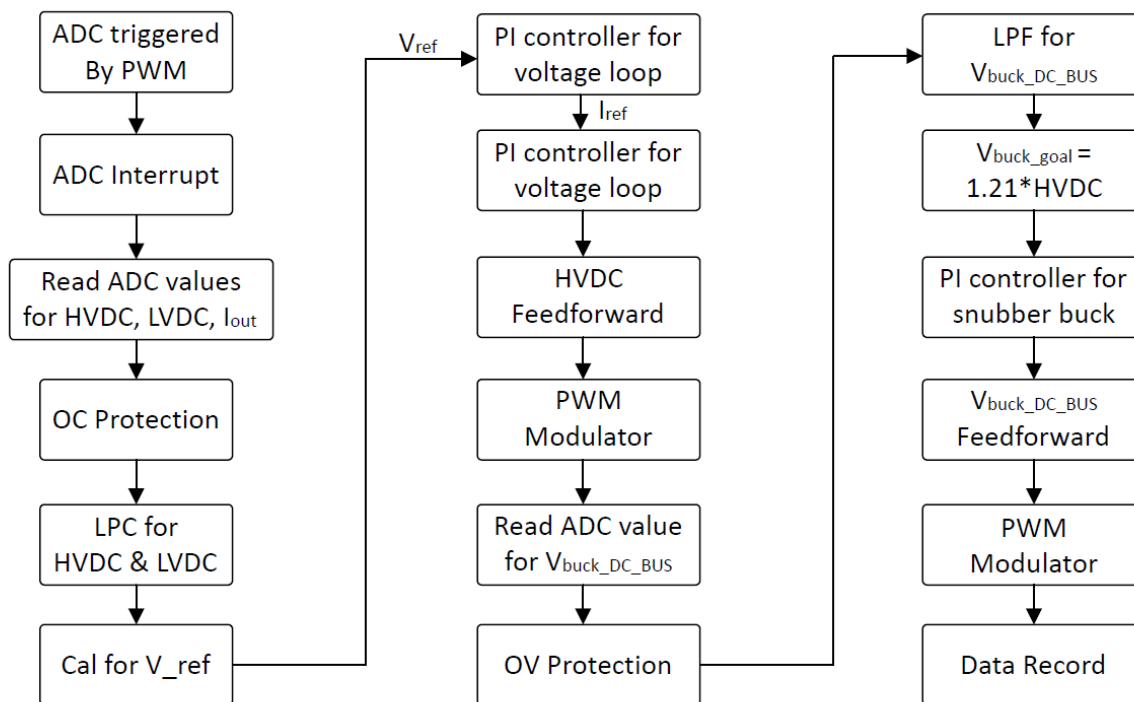
## 2.3 制御コードの実行処理

処理全体は、PWM 信号によってトリガされた ADC 処理により開始します。ADC は検出された出力電流/電圧データをデジタルデータに変換した後に MCU 内で割り込みをトリガします。次いで入力/出力電圧と出力電流のデジタル値が読み出され、信号処理と PI 制御の実行前にソフトウェアによる過電流保護機能が実行されます。PI コントローラは、2 ループ回路(電圧ループと電流ループ)により実装されます。制御内で DC フィードフォワード値も加算された後に、制御値はメイン パワーデバイス向け PWM 変調器により PWM 信号に変換されます。この後に、スナバ降圧回路向けの PI 制御が実行され、スナバ降圧スイッチ向けの PWM 信号が別の PWM 変調器により生成されます。

コード設計と制御の実装に関する詳細は、Microchip 社の技術サポート([www.microchip.com/sic](http://www.microchip.com/sic))にお問い合わせください。

図 2-11 に、制御コードの実行処理フローを示します。

図 2-11. 制御コードの実行処理フロー



### 3. 電源投入/遮断手順

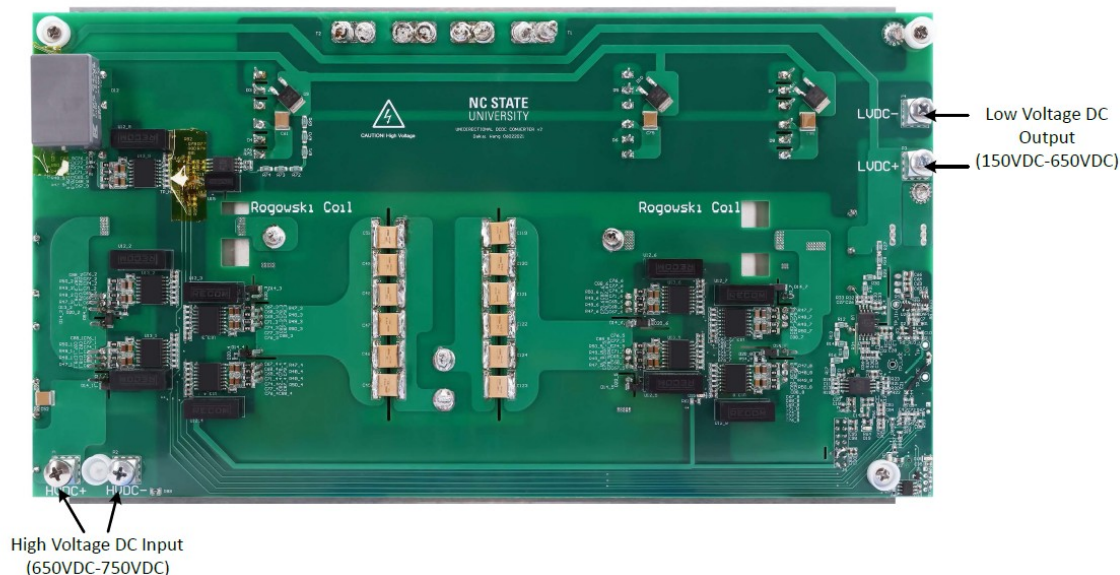
以下では、電源の投入/遮断手順について説明します。

#### 3.1 電源投入手順

評価用ボードの電源投入手順は以下の通りです。

1. DC 入力電源を高電圧 DC 入力端子に接続します。  
**Note:** 入力電圧が DC 650~750 V のレンジ内であることを確認します。
2. 抵抗性負荷を低電圧 DC 出力端子に接続します(図 3-1 参照)。  
**Note:** 出力負荷は、DC-DC コンバータの出力電圧(DC 150~650 V)と出力電力(最大 30 kW)に見合った定格を有する必要があります。

図 3-1. デモハードウェアの上面



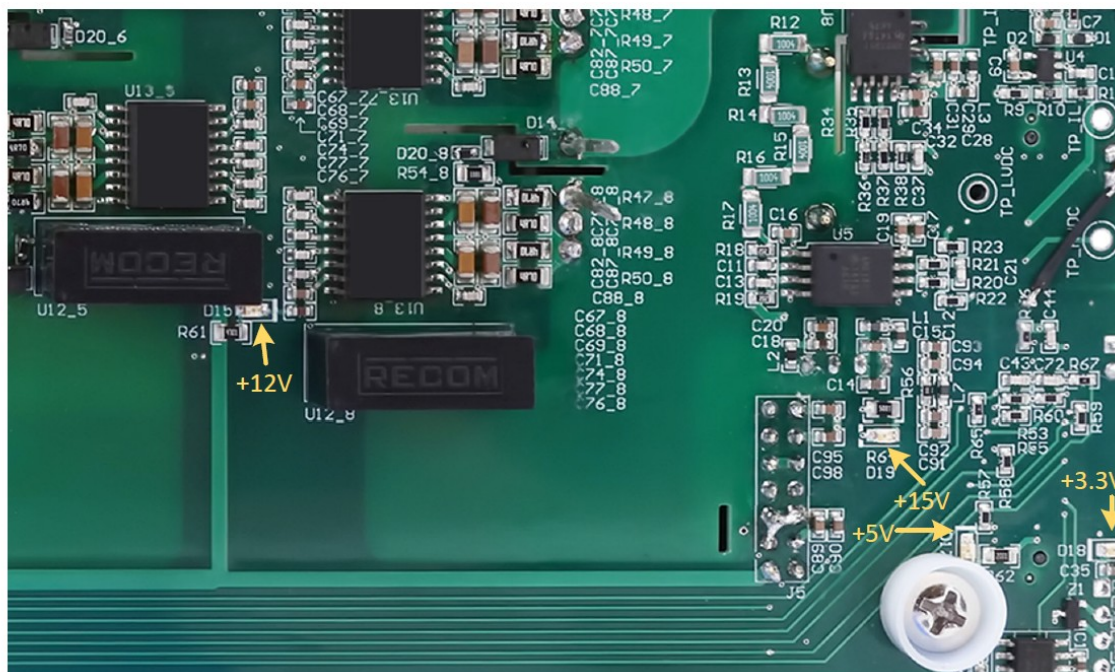
3. 12 V をバイアス電源入力コネクタと 2 つのファン用コネクタに印加します(図 3-2 参照)。  
**Note:**
  - バイアス電源は 1 A 以上の電流定格を有する必要があります。
  - 4 個のバイアス電源 LED が点灯する事を確認します。

図 3-2. デモ ハードウェアの前面





図 3-3. バイアス電源 LED の位置



4. コンピュータ (シリアル ターミナル プログラムを実行)を dsPIC コントローラ ボードの USB ポートに接続します。  
**Note:** baud レート = 15200、データビット数 = 8、パリティ = なし、ストップビット数 = 1
5. 制御コードは、出力電圧が 400 V に設定された定電圧モードで起動するようプログラミングされています。  
**Note:** 設計では 60 A が最大電流になっています。
6. コンバータを起動します。UART (Using the Universal Asynchronous Receiver and Transmitter)を使って、文字「E」を送信します。
7. 出力負荷を必要なレベルまで増加させます(出力電流は 60 A 以下、出力電力は 30 kW 以下に制限)。

## 3.2 電源遮断手順

評価用ボードの電源遮断手順は以下の通りです。

1. UART を使って文字「D」を送信します。
2. 出力電圧が安全なレベルまで放電された事を確認します。
3. 入力 DC 電圧を遮断します。
4. 入力電圧が安全なレベルまで放電された事を確認します。
5. バイアス電源を遮断します。

## 4. 試験結果

以下では、デモ ハードウェアの試験結果(電气的性能、効率、熱特性)について説明します。

### 4.1 電气的性能

本コンバータは、Microchip 社が提案する回路構成と変調方式により非常に幅広い出力電圧レンジで ZVS を達成するため、バッテリー充電モジュール アプリケーション向けに最適です。

図 4-1 と図 4-2 に、異なる出力電圧での各相の ZVS 動作を示します。

図 4-1.  $V_m = 0.55$  での各相の ZVS 動作 (デュアル ハーフブリッジ モード、70 kHz)

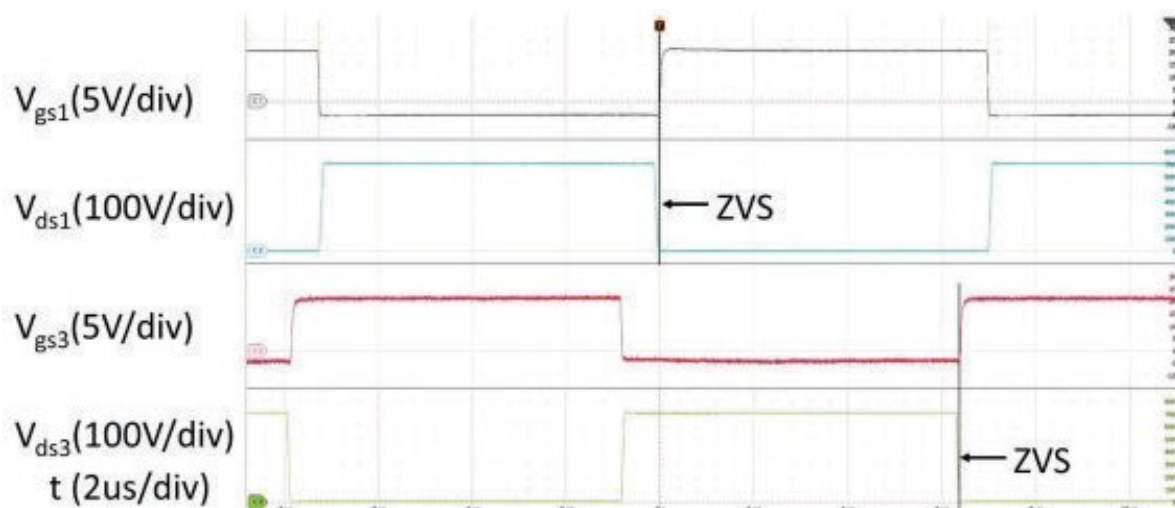


図 4-2.  $V_m = 1.1$  での各相の ZVS 動作 (デュアル ハーフブリッジ モード、140 kHz)

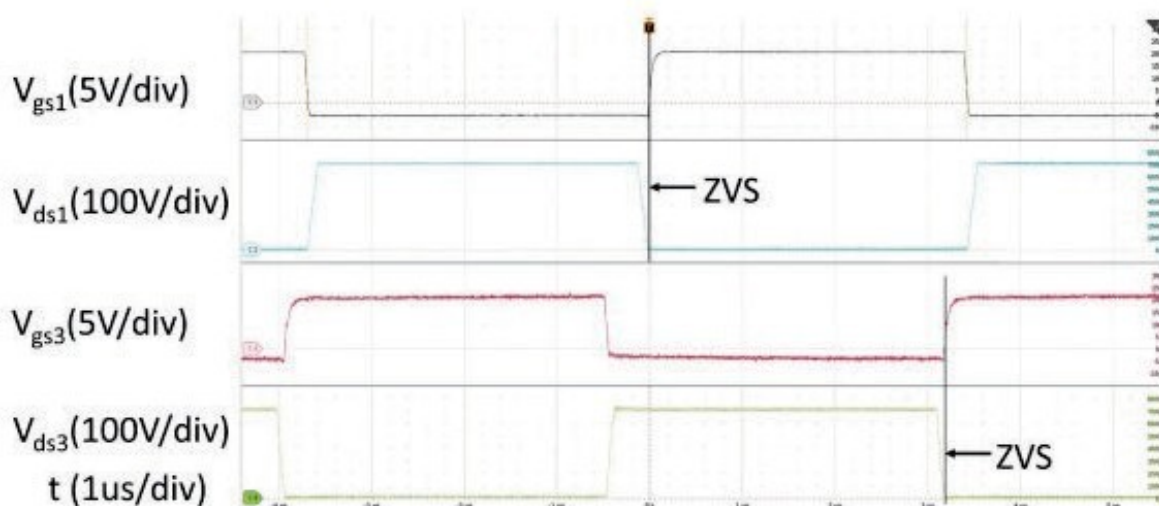


図 4-3 に、負荷ステップ(1 kW→8k W) 中の遅れ H ブリッジの ZVS 動作を示します。この結果は、本コンバータが低負荷から中負荷まで ZVS モードで動作して幅広いレンジで高効率を維持する事を示しています。

図 4-3. 負荷ステップ(1 kW→8 kW)中の遅れ H ブリッジの ZVS 動作

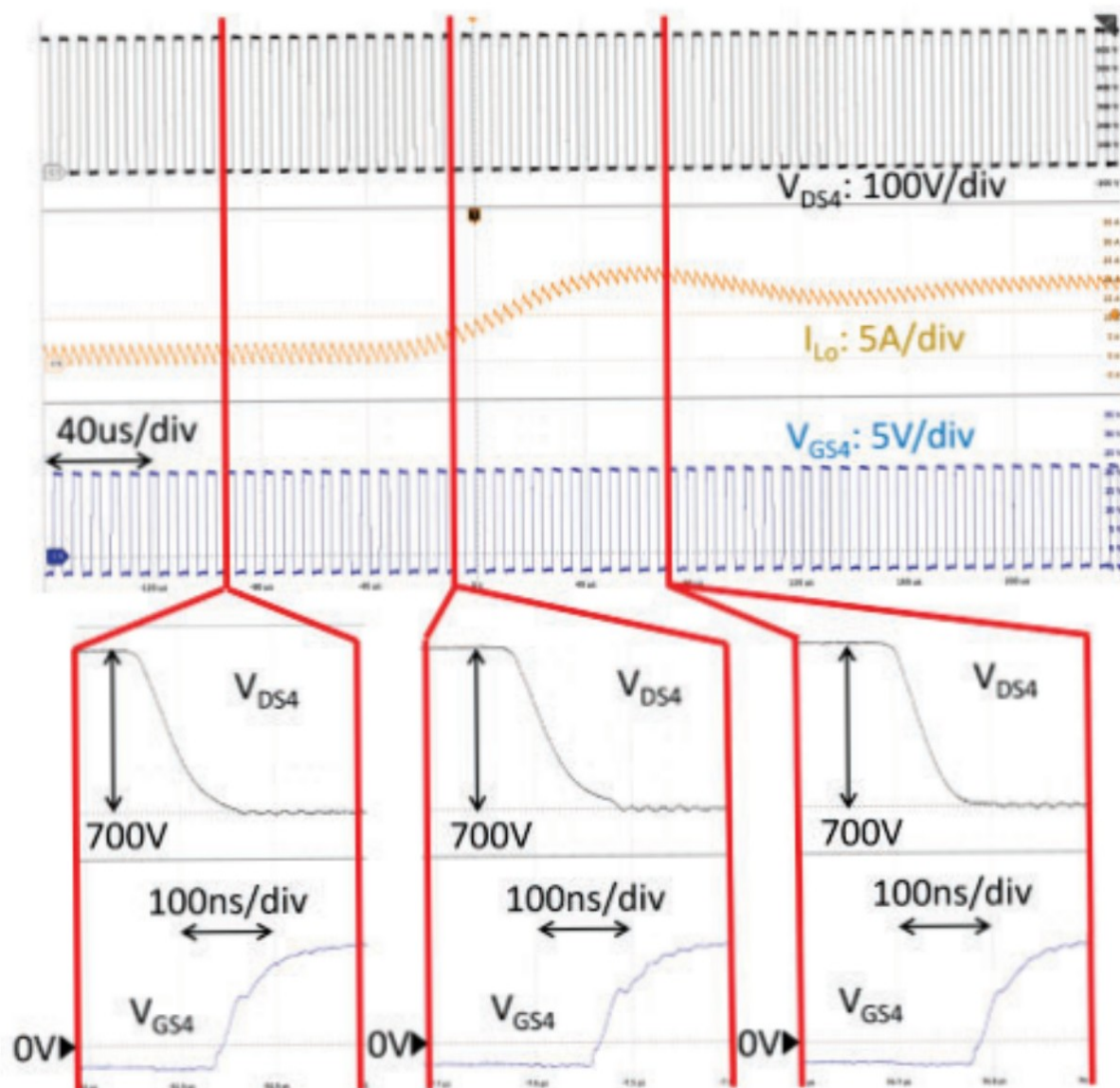


図 4-4 に示す通り、入力電圧のステップ遷移中も遅れ H ブリッジの ZVS 動作は維持されます。下図では、入力電圧が 400  $\mu$ s 以内に 750 V から 650 V へ変化しています。

図 4-4. 入力電圧ステップ(750 V→650 V)中の遅れ H ブリッジの ZVS 動作

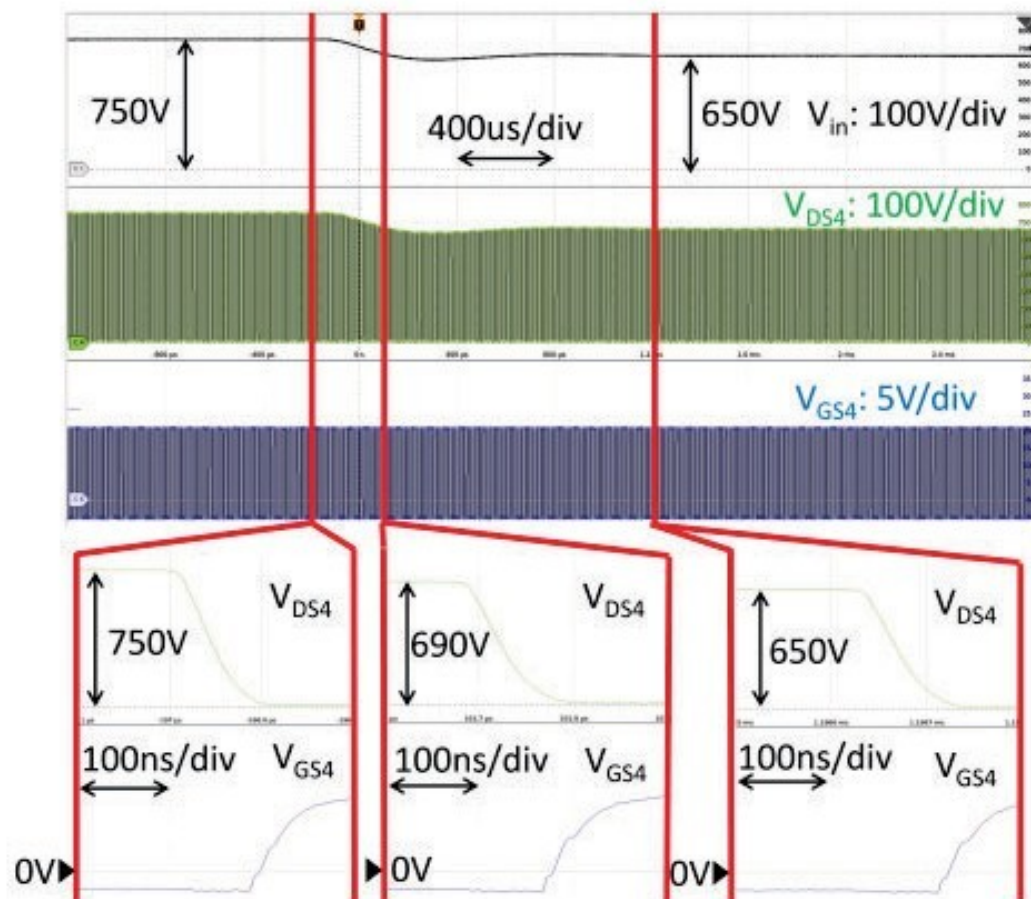


図 4-5 に、負荷ステップ中の動作を示します。入力電圧は 700 V、目標出力電圧は 500 V です。機械式 2 極スイッチを使って負荷抵抗ステップ(23  $\Omega$ →17  $\Omega$ )を与える事で、出力電力ステップ(11 kW→15 kW)が得られます。12 ms 中に 20 V の出力電圧ディップが生じています。EV 充電モジュール アプリケーションの場合、負荷はこれほど急激に変化しないため、出力電圧の変動は大幅に小さくなります。



下図に、負荷ステップ(11 kW→15 kW、出力電圧 = 500 V)に対する応答を示します。

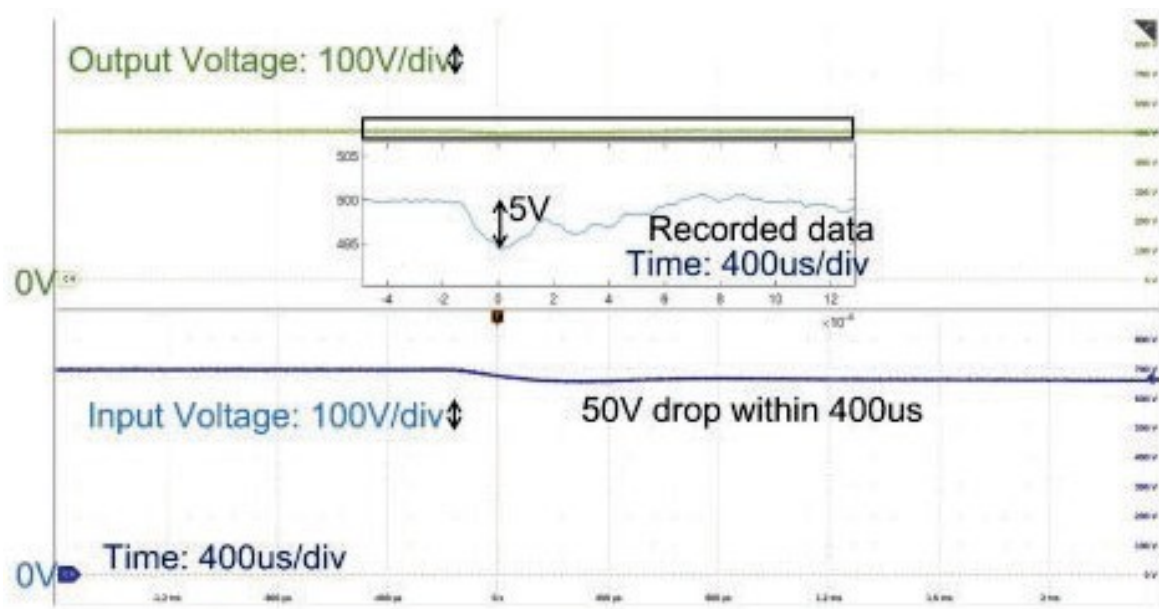
図 4-5. 負荷ステップ応答(11 kW→15 kW、出力電圧 = 500 V)



図 4-6 に、入電圧ステップ中の動作を示します。入力電圧は 500  $\mu$ s 中に 700 V から 650 V まで低下します。出力電圧は 500 V に設定し、コンバータ負荷は 11 kW です。入力電圧ステップ中の出力電圧の変動幅は 5 V 未満です。入力電圧のフィードフォワードのおかげで出力への影響は大きくありません。

下図に、入力電圧ステップ(700 V→650 V、出力電圧 = 500 V)に対する応答を示します。

図 4-6. 入力電圧ステップ応答(700 V→650 V、出力電圧 = 500 V)



デュアル ハーフブリッジ(HB)モードとデュアル フルブリッジ(FB)モードの間のモード遷移は、トポロジ モーフィングにより実現します。デュアル FB モードからデュアル HB モードへの遷移では、電圧がしき い値を下まわった時に、デューティサイクルは 50%から 0%へ直線的に変化し、スイッチング周波数は 140 kHz から 70 kHz へ直線的に変化します。逆にデュアル HB モードからデュアル FB モードへの遷移 では、電圧がしきい値を上回った時に、デューティサイクルは 0%から 50%へと変化し、スイッチング 周波数は 70 kHz から 140 kHz へと変化します。出力電圧は、進み相と遅れ相の間の位相シフトを使っ て調整されます。

図 4-7 に、モード遷移中の動作を示します。この試験(定電流動作時)では、出力インダクタの目標電流値 を 14 A で一定とし、 $t_0$ のタイミングで負荷抵抗を 16  $\Omega$  から 35  $\Omega$  へステップ状に変化させています。結 果として、出力電圧はデュアル HB モード時の 220 V からデュアル FB モード時の 490 V へと変化しま す。この電圧遷移は、20 ms ( $t_1 \sim t_2$ ) 以内に終了します。バッテリー充電モジュール アプリケーションの場 合、負荷バッテリーの電圧変化はこの試験よりも大幅に低速であるため、モード遷移時の動作はより円滑 となります。

下図にデュアル HB モードからデュアル FB モードへのモード遷移時の動作を示します。

図 4-7. 負荷ステップに伴うモード遷移時の応答

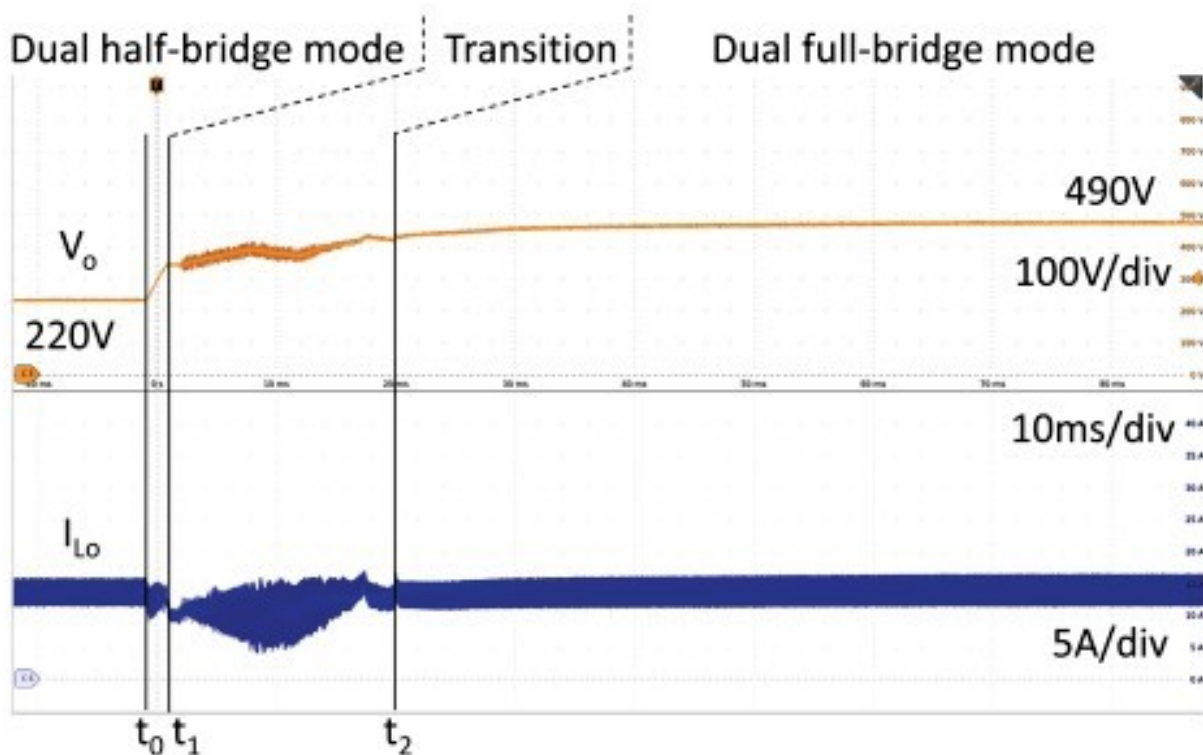
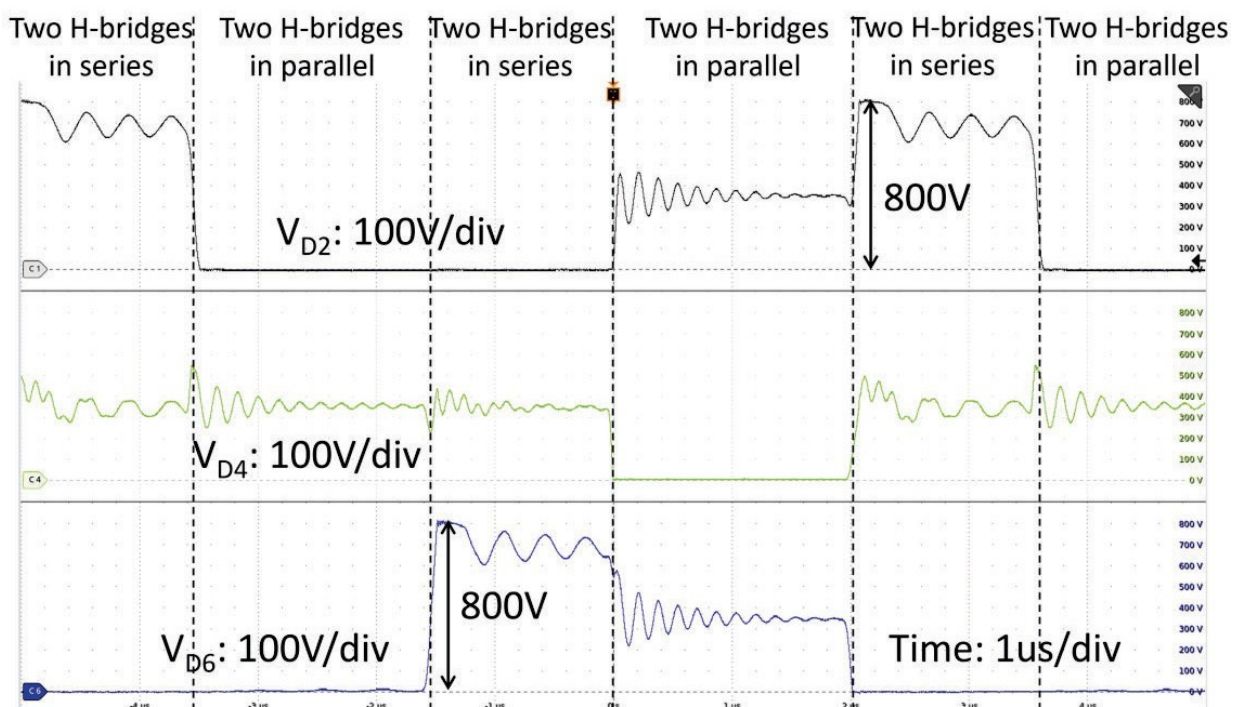


図 4-8 に、ダイオード D2、D4、D6 の両端電圧を示します。D2 と D6 の最大電圧スパイクは、設計値通 りの 800 V でクランプされています。2 つの H ブリッジを並列に接続した場合の共振周波数は、それら を直列に接続した場合に比べて約 2 倍となります。これは、L1 と L2 が並列となるか直列となるかによ って等価共振インダクタンスが異なるためです。



下図に、アクティブスナバによってピーク電圧がクランプされたダイオード電圧波形を示します。

図 4-8. アクティブスナバによってピーク電圧がクランプされたダイオード電圧波形



## 4.2 効率

図 4-9 に効率の等高線図を示し、図 4-10 に効率の 3 次元(3D)マップを示します。これらは、動作領域内に均等に配置された 102 個の試験点での結果に基づきます。効率マップを作成するため、別途 300 kW の調整可能な負荷バンクを用意し、様々な出力電圧/電流条件を設定しています。また、出力電圧レギュレーションを確認するため、各種の負荷条件にて位相シフトを動作領域内で調整しています。動作の切り替わる境界条件下では位相シフトが最小値あるいは最大値で一定に保たれるため、負荷が増大したときに出力電圧が低下します(デューティサイクルロスと ESR による電圧降下のため)。ピーク効率はデュアル FB モードで 98.5%、デュアル HB モードで 98.2% を達成します。出力電流が定格出力電流の 30% を超える領域において、約 97% の効率が維持されます。また、この結果は、最高および最低出力電圧境界においても Microchip 社が提案するコンバータ回路のデューティサイクル ロスが低い事を立証しています。

図 4-9. 試験結果に基づく効率の等高線図と出力電力境界

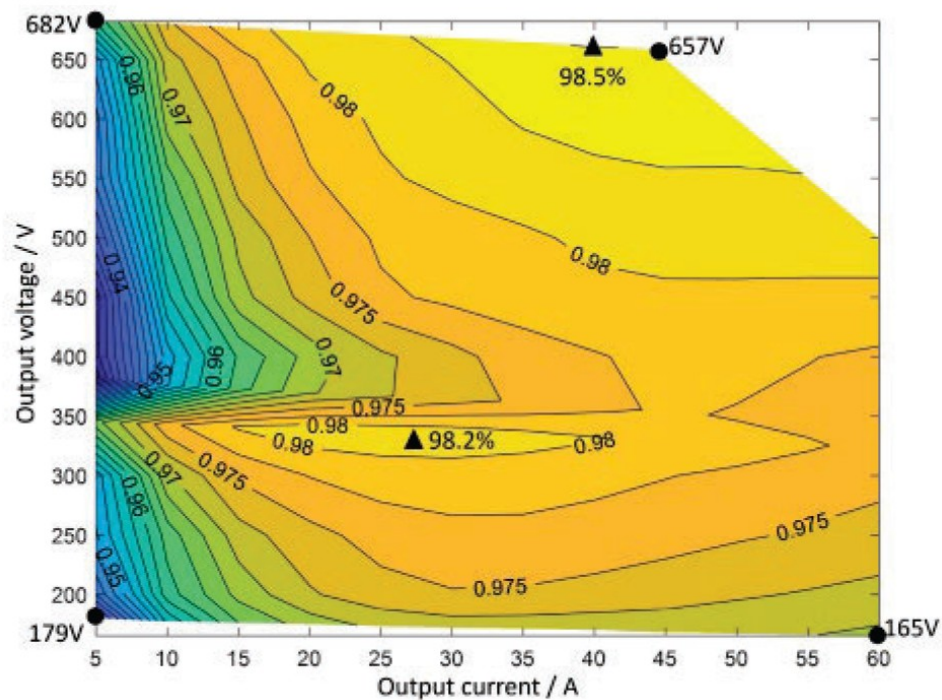
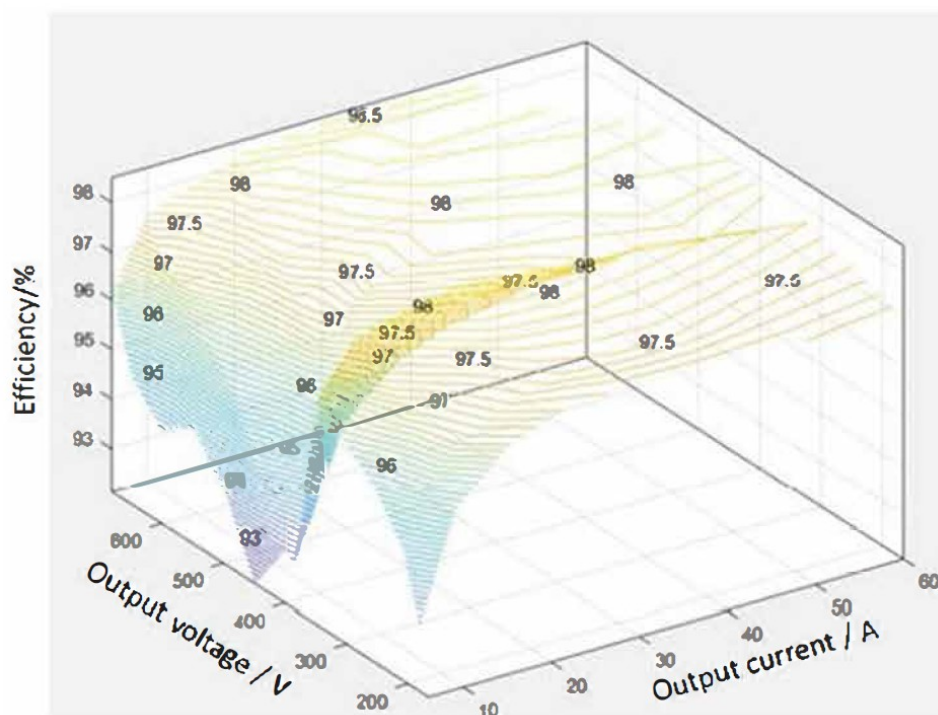


図 4-10. 試験結果に基づく効率の 3D マップ



### 4.3 熱特性

下図に、室温でフルパワー動作中の評価ボード機器を撮影したサーモグラフィ画像を示します。

**Note:** 画像から計測した評価ボード機器の最高温度は約 72.8 °C です。

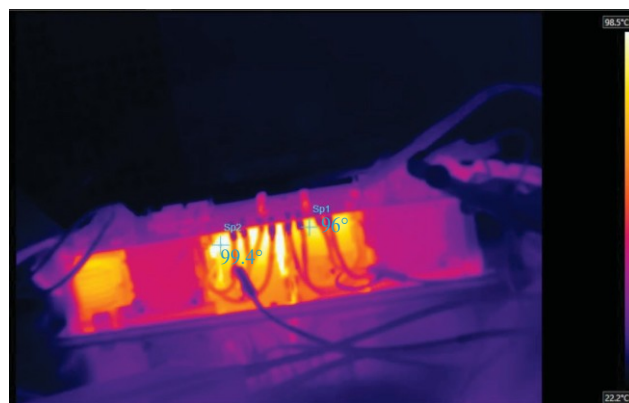
図 4-11. フルパワー動作時の評価ボード機器のサーモグラフィ画像



下図に、室温でフルパワー動作中のコンバータ全体を撮影したサーモグラフィ画像を示します。

**Note:** 最高温度はトランスで計測され、99.4 °Cに達しています。

図 4-12. フルパワー動作時のコンバータ全体のサーモグラフィ画像



## 5. 参考文献

本書では以下の文書を参照します。

- D. Wang et al., "Isolated 4- Level DC- DC Converter with Enhanced Soft-Switching Adaptability and Output Voltage Flexibility for High-Power Charger Applications," 2022 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2022, pp. 2021-2028
- D. Wang et al., "Isolated 3-Level DC-DC Converter With Complete ZVS Using Magnetizing Inductors," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 38, no. 2, pp. 1910-1923, Feb. 2023
- MSC025SMA120B4 Data Sheet—SiC MOSFET, 25 mΩ, 1200V
- MSC050SDA120BCT Data Sheet—SiC Schottky Barrier Diode, 50A, 1200V
- MSC010SDA120B Data Sheet—SiC Schottky Barrier Diode, 10A, 1200V
- dsPIC33CK256MP506 Data Sheet—16-bit dsPIC microcontroller
- ATA6561-GAQW Data Sheet—CAN FD transceiver
- MCP6V51T-E Data Sheet—Op Amp
- MCP1501T-30E Data Sheet—Op Amp
- MCP3221A0T-3 Data Sheet—A/D Converter with I<sup>2</sup>C Interface

## 6. 改訂履歴

本書に適用された変更の履歴を最新版から順にリビジョンごとに記載します。

| リビジョン | 日付         | 変更内容     |
|-------|------------|----------|
| A     | 2023 年 5 月 | 本書は初版です。 |



# Microchip 社の情報

## Microchip 社ウェブサイト

Microchip 社はウェブサイト([www.microchip.com](http://www.microchip.com))を通してオンライン サポートを提供しています。当ウェブサイトでは、お客様に役立つ情報やファイルを簡単に見つけ出せます。以下を含む各種の情報をご覧になれます。

- **製品サポート** - データシートとエラッタ、アプリケーション ノートとサンプル プログラム、設計リソース、ユーザガイドとハードウェア サポート文書、最新のソフトウェアと過去のソフトウェア
- **技術サポート** - FAQ(よく寄せられる質問)、技術サポートのご依頼、オンライン ディスカッション グループ、Microchip 社のデザイン パートナー プログラムおよびメンバーリスト
- **ご注文とお問い合わせ** - 製品セレクトと注文ガイド、最新プレスリリース、セミナー/イベントの一覧、お問い合わせ先(営業所/正規代理店)の一覧

## 製品変更通知サービス

Microchip 社の製品変更通知サービスは、お客様に Microchip 社製品の最新情報をお届けする配信サービスです。ご興味のある製品ファミリまたは開発ツールに関する変更、更新、リビジョン、エラッタ情報をいち早くメールにてお知らせします。

<http://www.microchip.com/pcn> にアクセスし、登録手続きをしてください。

## カスタマサポート

Microchip 社製品をお使いのお客様は、以下のチャンネルからサポートをご利用になれます。

- 正規代理店
- 技術サポート

サポートは正規代理店にお問い合わせください。各地の営業所もご利用になれます。本書の最後のページに各国の営業所の一覧を記載しています。

技術サポートは以下のウェブページからもご利用になれます。[www.microchip.com/support](http://www.microchip.com/support)

## Microchip 社のデバイスコード保護機能

Microchip 社製品のコード保護機能について以下の点にご注意ください。

- Microchip 社製品は、該当する Microchip 社データシートに記載の仕様を満たしています。
- Microchip 社では、通常の条件ならびに仕様に従って使った場合、Microchip 社製品のセキュリティ レベルは、現在市場に流通している同種製品の中でも最も高度であると考えています。
- Microchip 社はその知的財産権を重視し、積極的に保護しています。Microchip 社製品のコード保護機能の侵害は固く禁じられており、デジタル ミレニアム著作権法に違反します。
- Microchip 社を含む全ての半導体メーカーで、自社のコードのセキュリティを完全に保証できる企業はありません。コード保護機能とは、Microchip 社が製品を「解読不能」として保証するものではありません。コード保護機能は常に進歩しています。Microchip 社では、常に製品のコード保護機能の改善に取り組んでいます。

## 法律上の注意点

本書および本書に記載されている情報は、Microchip 社製品を設計、テスト、お客様のアプリケーションと統合する目的を含め、Microchip 社製品に対してのみ使用する事ができます。それ以外の方法でこの情報を使用する事はこれらの条項に違反します。デバイス アプリケーションの情報は、ユーザの便宜のためにのみ提供されるものであり、更新によって変更となる事があります。

お客様のアプリケーションが仕様を満たす事を保証する責任は、お客様にあります。 その他のサポートについては、弊社または代理店にお問い合わせになるか、[www.microchip.com/en-us/support/design-help/client-support-services](http://www.microchip.com/en-us/support/design-help/client-support-services) をご覧ください。

Microchip 社は本書の情報を「現状のまま」で提供しています。

Microchip 社は明示的、暗黙的、書面、口頭、法定のいずれであるかを問わず、本書に記載されている情報に関して、非侵害性、商品性、特定目的への適合性の暗黙的保証、または状態、品質、性能に関する保証をはじめとするいかなる類の表明も保証も行いません。

いかなる場合も Microchip 社は、本情報またはその使用に関連する間接的、特殊的、懲罰的、偶発的、または必然的損失、損害、費用、経費のいかににかかわらず、また Microchip 社がそのような損害が生じる可能性について報告を受けていた場合あるいは損害が予測可能であった場合でも、一切の責任を負いません。法律で認められる最大限の範囲を適用しようとも、本情報またはその使用に関連する一切の申し立てに対する Microchip 社の責任限度額は、使用者が当該情報に関連して Microchip 社に直接支払った額を超えません。

Microchip 社の明示的な書面による承認なしに、生命維持装置あるいは生命安全用途に Microchip 社の製品を使用する事は全て購入者のリスクとし、また購入者はこれによって発生したあらゆる損害、クレーム、訴訟、費用に関して、Microchip 社は擁護され、免責され、損害をうけない事に同意するものとします。特に明記しない場合、暗黙的あるいは明示的を問わず、Microchip 社が知的財産権を保有しているライセンスは一切譲渡されません。

## 商標

Microchip 社の名称とロゴ、Microchip ロゴ、Adaptec、AVR、AVR ロゴ、AVR Freaks、BesTime、BitCloud、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、flexPWR、HELDO、IGLOO、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LinkMD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、Microsemi、Microsemi ロゴ、MOST、MOST ロゴ、MPLAB、OptoLyzer、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32 ロゴ、PolarFire、Prochip Designer、QTouch、SAM-BA、SenGenuity、SpyNIC、SST、SST ロゴ、SuperFlash、Symmetricom、SyncServer、Tachyon、TimeSource、tinyAVR、UNI/O、Vectron、XMEGA は米国およびその他の国における Microchip Technology Incorporated の登録商標です。

AgileSwitch、APT、ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、Flashtec、Hyper Speed Control、HyperLight Load、Libero、motorBench、mTouch、Powermite 3、Precision Edge、ProASIC、ProASIC Plus、ProASIC Plus ロゴ、Quiet-Wire、SmartFusion、SyncWorld、Temux、TimeCesium、TimeHub、TimePictra、TimeProvider、TrueTime、ZL は米国における Microchip Technology Incorporated の登録商標です。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、Augmented Switching、BlueSky、BodyCom、Clockstudio、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoAutomotive、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、Espresso T1S、EtherGREEN、GridTime、IdealBridge、In-Circuit Serial Programming、ICSP、INICnet、Intelligent Paralleling、IntelliMOS、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、Knob-on-Display、KoD、maxCrypto、maxView、memBrain、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certified logo、MPLIB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICkit、PICKtail、PowerSmart、PureSilicon、QMatrix、REAL ICE、Ripple Blocker、RTAX、RTG4、SAM-ICE、Serial Quad I/O、simpleMAP、SimpliPHY、SmartBuffer、SmartHLS、SMART-I.S.、storClad、SQL、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Switchtec、SynchroPHY、Total Endurance、Trusted Time、TSHARC、USBCheck、VariSense、VectorBlox、VeriPHY、ViewSpan、WiperLock、XpressConnect、ZENA 米国およびその他の国における Microchip Technology Incorporated の商標です。

SQTP は米国における Microchip Technology Incorporated のサービス マークです。

Adaptec ロゴ、Frequency on Demand、Silicon Storage Technology、Symmcom はその他の国における Microchip Technology Incorporated の登録商標です。

GestIC は、その他の国における Microchip Technology Germany II GmbH & Co. KG (Microchip Technology Inc.の子会社)の登録商標です。

その他の商標は各社に帰属します。

© 2024, Microchip Technology Incorporated and its subsidiaries. All Rights Reserved.

ISBN: 978-1-6683-3566-6

## 品質管理システム

Microchip 社の品質管理システムについては [www.microchip.com/quality](http://www.microchip.com/quality) をご覧ください。

## 各国の営業所とサービス

| 北米                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | アジア/太平洋                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | アジア/太平洋                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | ヨーロッパ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>本社</b><br>2355 West Chandler Blvd.<br>Chandler, AZ 85224-6199<br>Tel:480-792-7200<br>Fax:480-792-7277<br>技術サポート:<br><a href="http://www.microchip.com/support">http://www.microchip.com/support</a><br>URL:<br><a href="http://www.microchip.com">www.microchip.com</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | <b>オーストラリア - シドニー</b><br>Tel:61-2-9868-6733<br><br><b>中国 - 北京</b><br>Tel:86-10-8569-7000<br><br><b>中国 - 成都</b><br>Tel:86-28-8665-5511<br><br><b>中国 - 重慶</b><br>Tel:86-23-8980-9588<br><br><b>中国 - 東莞</b><br>Tel:86-769-8702-9880<br><br><b>中国 - 広州</b><br>Tel:86-20-8755-8029<br><br><b>中国 - 杭州</b><br>Tel:86-571-8792-8115<br><br><b>中国 - 香港 SAR</b><br>Tel:852-2943-5100<br><br><b>中国 - 南京</b><br>Tel:86-25-8473-2460<br><br><b>中国 - 青島</b><br>Tel:86-532-8502-7355<br><br><b>中国 - 上海</b><br>Tel:86-21-3326-8000<br><br><b>中国 - 瀋陽</b><br>Tel:86-24-2334-2829<br><br><b>中国 - 深圳</b><br>Tel:86-755-8864-2200<br><br><b>中国 - 蘇州</b><br>Tel:86-186-6233-1526<br><br><b>中国 - 武漢</b><br>Tel:86-27-5980-5300<br><br><b>中国 - 西安</b><br>Tel:86-29-8833-7252<br><br><b>中国 - 厦門</b><br>Tel:86-592-2388138<br><br><b>中国 - 珠海</b><br>Tel:86-756-3210040 | <b>インド - バンガロール</b><br>Tel:91-80-3090-4444<br><br><b>インド - ニューデリー</b><br>Tel:91-11-4160-8631<br><br><b>インド - プネ</b><br>Tel:91-20-4121-0141<br><br><b>日本 - 大阪</b><br>Tel:81-6-6152-7160<br><br><b>日本 - 東京</b><br>Tel:81-3-6880-3770<br><br><b>韓国 - 大邱</b><br>Tel:82-53-744-4301<br><br><b>韓国 - ソウル</b><br>Tel:82-2-554-7200<br><br><b>マレーシア - クアラルンプール</b><br>Tel:60-3-7651-7906<br><br><b>マレーシア - ペナン</b><br>Tel:60-4-227-8870<br><br><b>フィリピン - マニラ</b><br>Tel:63-2-634-9065<br><br><b>シンガポール</b><br>Tel:65-6334-8870<br><br><b>台湾 - 新竹</b><br>Tel:886-3-577-8366<br><br><b>台湾 - 高雄</b><br>Tel:886-7-213-7830<br><br><b>台湾 - 台北</b><br>Tel:886-2-2508-8600<br><br><b>タイ - バンコク</b><br>Tel:66-2-694-1351<br><br><b>ベトナム - ホーチミン</b><br>Tel:84-28-5448-2100 | <b>オーストリア - ヴェルス</b><br>Tel:43-7242-2244-39<br>Fax:43-7242-2244-393<br><br><b>デンマーク - コペンハーゲン</b><br>Tel:45-4485-5910<br>Fax:45-4485-2829<br><br><b>フィンランド - エスポー</b><br>Tel:358-9-4520-820<br><br><b>フランス - パリ</b><br>Tel:33-1-69-53-63-20<br>Fax:33-1-69-30-90-79<br><br><b>ドイツ - ガーヒング</b><br>Tel:49-8931-9700<br><br><b>ドイツ - ハーゲン</b><br>Tel:49-2129-3766400<br><br><b>ドイツ - ハイムブロン</b><br>Tel:49-7131-72400<br><br><b>ドイツ - カールスルーエ</b><br>Tel:49-721-625370<br><br><b>ドイツ - ミュンヘン</b><br>Tel:49-89-627-144-0<br>Fax:49-(89/-627)-144/-44<br><br><b>ドイツ - ローゼンハイム</b><br>Tel:49-8031-354-560<br><br><b>イスラエル - ラーナナ</b><br>Tel:972-9-744-7705<br><br><b>イタリア - ミラノ</b><br>Tel:39-0331-742611<br>Fax:39-0331-466781<br><br><b>イタリア - パドヴァ</b><br>Tel:39-049-7625286<br><br><b>オランダ - ドリュウネン</b><br>Tel:31-416-690399<br>Fax:31-416-690340<br><br><b>ノルウェー - トロンハイム</b><br>Tel:47-7288-4388<br><br><b>ポーランド - ワルシャワ</b><br>Tel:48-22-3325737<br><br><b>ルーマニア - ブカレスト</b><br>Tel:40-21-407-87-50<br><br><b>スペイン - マドリッド</b><br>Tel:34-91-708-08-90<br>Fax:34-91-708-08-91<br><br><b>スウェーデン - ヨーテボリ</b><br>Tel:46-31-704-60-40<br><br><b>スウェーデン - ストックホルム</b><br>Tel:46-8-5090-4654<br><br><b>イギリス - ウォーキンガム</b><br>Tel:44-118-921-5800<br>Fax:44-118-921-5820 |
| <b>アトランタ</b><br>Duluth, GA<br>Tel:678-957-9614<br>Fax:678-957-1455<br><br><b>オースティン, TX</b><br>Tel:512-257-3370<br><br><b>ボストン</b><br>Westborough, MA<br>Tel:774-760-0087<br>Fax:774-760-0088<br><br><b>シカゴ</b><br>Itasca, IL<br>Tel:630-285-0071<br>Fax:630-285-0075<br><br><b>ダラス</b><br>Addison, TX<br>Tel:972-818-7423<br>Fax:972-818-2924<br><br><b>デトロイト</b><br>Novi, MI<br>Tel:248-848-4000<br><br><b>ヒューストン, TX</b><br>Tel:281-894-5983<br><br><b>インディアナポリス</b><br>Noblesville, IN<br>Tel:317-773-8323<br>Fax:317-773-5453<br>Tel:317-536-2380<br><br><b>ロサンゼルス</b><br>Mission Viejo, CA<br>Tel:949-462-9523<br>Fax:949-462-9608<br>Tel:951-273-7800<br><br><b>ローリー, NC</b><br>Tel:919-844-7510<br><br><b>ニューヨーク, NY</b><br>Tel:631-435-6000<br><br><b>サンノゼ, CA</b><br>Tel:408-735-9110<br>Tel:408-436-4270<br><br><b>カナダ - トロント</b><br>Tel:905-695-1980<br>Fax:905-695-2078 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |