EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH 18 Vブラシレス DC モータードライブ ボード

著者: ピーター B グリーン (Peter B. Green)、
セルゲイ ヴォスカニャン (Sergey Voskanyan)

Get exclusive information
Register product

本ドキュメントについて

範囲と目的

本書は、コードレス電動工具などのアプリケーションに使用される矩形波制御のバッテリー駆動ブラシレス DC (BLDC) モーター ドライブ用 **EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH** 18V モーター駆動ボードの機能を説明します。本評価ボードは、ローター位置検出用のホールセンサーを内蔵したモーターで動作します。本ソリューションは、XMC1400シリーズのマイクロコントローラーと、三相スマート ドライバーICの6EDL7141およびクラス最高のパワーMOSFETであるインフィニオン OptiMOS™ 6を組み合わせています。6EDL7141は、システムの部品点数と開発期間を削減するとともに、電力密度、システム性能、およびピーク パワー パルス容量を大幅に向上させます。また、6EDL7141設定用に設計されたGUI (グラフィカル ユーザー インターフェース) ソフトウェア ツールも紹介します。.

対象読者

本書は、高性能なシステムソリューションを提供し、システムコストを削減したい設計者向けに、コードレス電動工具やその他のバッテリー駆動アプリケーションの市場について説明します。設計技術者、アプリケーション技術者、学生を対象としています。

主なインフィニオン部品

- **BSC007N04LS6** (OptiMOS™ 6 40 V 0.7 mΩ 5x6 PQFN)
- **6EDL7141** 三相ハーフブリッジMOSFETゲート ドライバー/モーター制御 IC
- **XMC1404-VQFN64-200 kB** ARM® Cortex®-M0搭載 32ビット マイクロコントローラー (XMC™)

目次

本ドキュメントについて **1**
目次 **2**
1 はじめに **3**
1.1 ブラシレス DCモーター 3
1.2 EVAL_6EDL7141_TRAP_1SHモーター駆動ボード 3
1.3 6EDL7141の機能概要 6
2 仕様 **10**
3 回路図 **11**
4 ハードウェアの機能説明 **17**
4.1 三相インバーターステージ 17
4.2 6EDL7141スマートゲートドライバー 19
4.2.1 ゲートドライバーの構成 20
4.2.1.1 ゲート駆動電流とタイミング 20
4.2.1.2 ゲート駆動電圧 22
4.2.1.3 EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH の値を決定 24
4.2.2 バックレギュレーターとリニアレギュレーターの構成 29
4.2.3 チャージポンプの構成 31
4.3 電流センスアンプの構成 31
4.3 XMC1404-VQFN64-200kBマイクロコントローラー 36
4.4 基板の接続と制御 37
4.5 オンボードプログラマ/デバッガー 37
4.6 外部プログラマー／デバッガー 37
5 制御 ファームウェア **38**
5.1 台形制御 (6段式、矩形波制御とも呼ばれる) 38
5.2 P-I 制御ブロック図 40
6 グラフィカルユーザーインターフェイス **41**
6.1 GUIからのファームウェアのダウンロード 42
6.2 6EDL7141のパラメーターを設定する 44
6.3 GUI によるボードの制御 47
7 部品構成 (BOM) **48**
8 モーター仕様 **52**
9 PCBレイアウト **54**
10 テスト結果 **58**
10.1 動作波形 58
10.1 電力測定 63
10.2 熱測定 64
11 おわりに **66**
12 参考文献 **67**
Revision history 68

1 はじめに

1.1 ブラシレス DCモーター

BLDCモーターは、機械的なブラシを使わずに、インバーターの制御スイッチングによって整流されるモーターです。巻線は決められた順序で通電され、回転磁界を発生させます。ローターの永久磁石はステーター磁界との吸引力・反発力により移動しようとし、トルクと回転運動を発生させます。機械式整流と同様に、電子式整流も従来の直流機と同様に一方向のトルクを得るのに役立ちます。BLDCモーターは、ローターが永久磁石で構成され、ステーターは巻線を巻かれた特定の極数をもつ構造で御座います。BLDCモーターは、アウターロータ型として製造されることが多いです。ローターの位置は、ステーターに組み込まれたデジタルホール効果センサーで感知することができます。

1.2 EVAL_6EDL7141_TRAP_1SHモーター駆動ボード

このアプリケーションノートでは、台形制御で動作する18Vバッテリー駆動工具用に最適化されたインフィニオンのEVAL_6EDL7141_TRAP_1SHモーター駆動評価ボードについて説明します。現在の設計では、ローターの位置検出と速度測定に使用される3つのホール センサーを備えたBLDCモーターの電気的ドライビング機能を考慮しています。本ボードでは、5x6 PQFN、SuperSO8パッケージのBSC007N04LS6 OptiMOS™ 6 40 V 0.7 mΩパワーMOSFETを使用しています。また、基板下面に着脱式ヒートシンクを取り付けることで、サーマルマネジメントの改善と出力電力能力の向上が可能です。
このデモボードには、USBタイプAポート経由でPCに直接接続できる絶縁型デバッガーが搭載されています。ソースコードは、Infineon EclipseベースのIDEであるDAVE™（XMC™マイクロコントローラー用開発プラットフォーム、www.infineon.com/DAVE）を使用して実装されています。制御方法は、パルス幅変調（PWM）と3つの位置センサーを使用したBLDCモーターをベースに、スカラ速度制御アルゴリズムを実装しています。ホールセンサーを用いた矩形波制御方式は、現在、電動工具用途の三相BLDCモーター制御で最も広く用いられている方式です。三相BLDCモーターの矩形波制御は、台形整流、6ステップ整流、120度整流とも呼ばれる電子整流方式です。各相は、逆起電力サイクルの正と負の期間に120度ずつ通電し、残りのサイクルはオフのままです。このアルゴリズムでは、電気角度60度ごとにローターの位置情報を必要とし、そのために3つのホールセンサーが使用されます。ファームウェアは、XMC1400ファミリー(www.infineon.com/XMC)を使用して開発されています。
このキットを使用すると、ユーザーは、電動工具アプリケーション向けにカスタマイズした機能を実装した制御アルゴリズムBLDC_SCALAR_HALL_XMC13により、XMC1400の制御機能を使用して6EDL7141ベースのモーター駆動システムを評価できます。本ボードには、モーターの回転方向の変更および速度制御するためのスイッチが備えられています。また、専用GUI1により、オンボードプログラマ/デバッガーと連動したUSBケーブルでデモボードに接続し、設定や制御を行うことも可能です。
デモキットには、注文オプションを選択する事で、Trinamic Motion Control GmbH社製の120度の相対角度で配置された3つのホールセンサーを備えたQBL4208-61-04-013 BLDCモーターも含まれる場合があります。これは、ホール センサーを使用したモーター アプリケーションの大半に相当しております。

[1] デフォルトのパラメータは、6EDL7141 データシート[1]の 8.2 「レジスタマップ」に太字で表示されています。

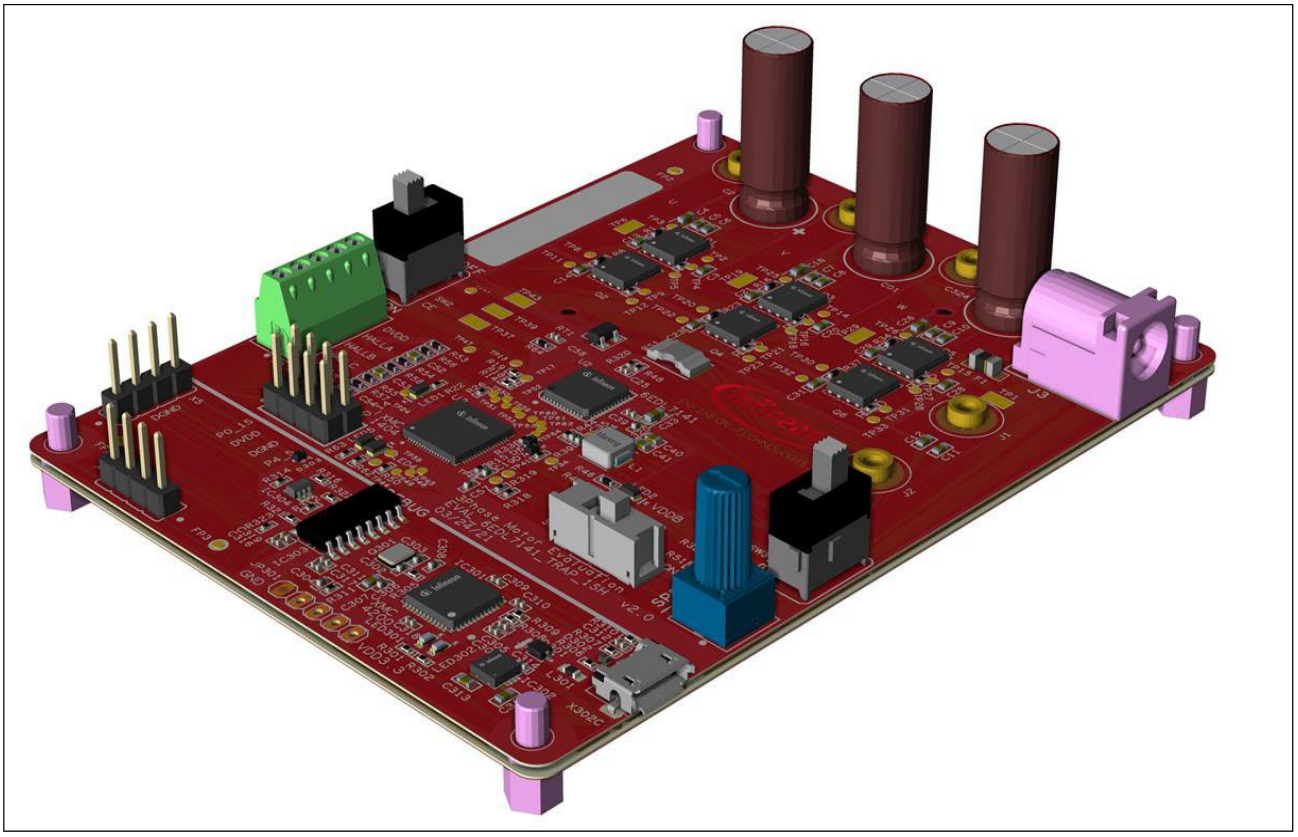

図 1　EVAL_6EDL7141_TRAP_1SHデモ ボード

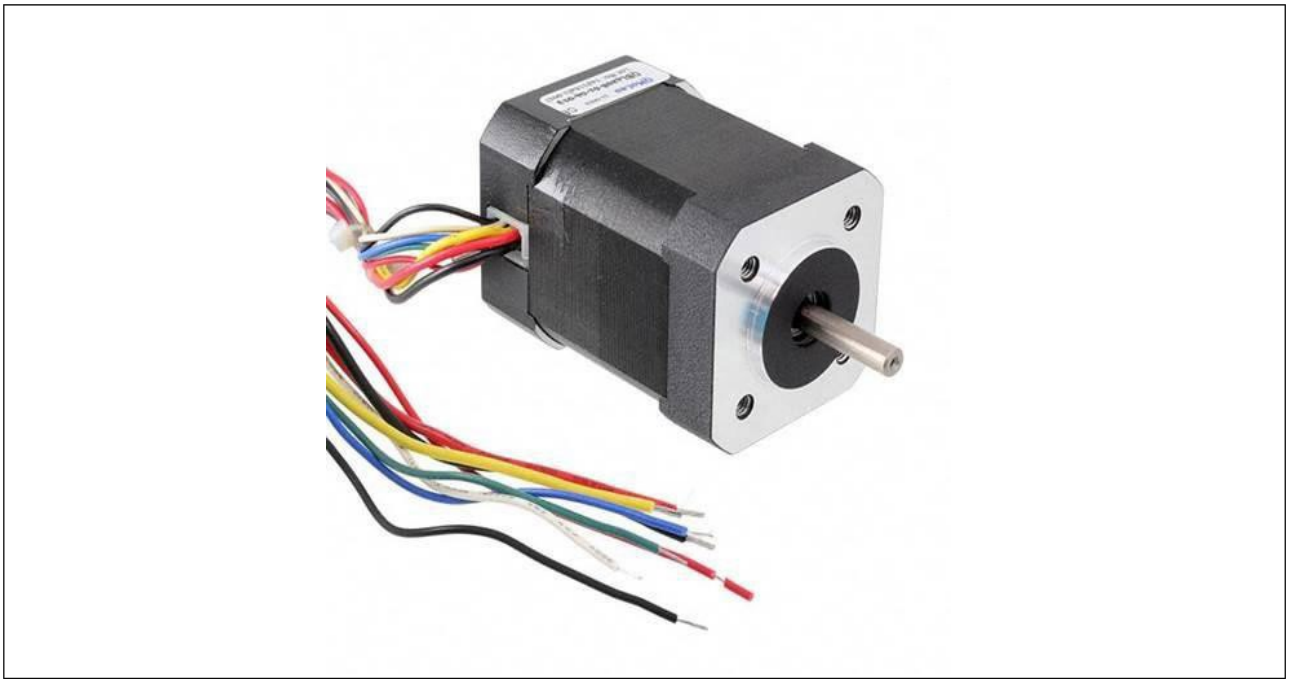

図 2　BLDCモーターの例

オンボード デバッガーを除く主なシステム要素のEVAL_6EDL7141_TRAP_1SHボード システム ブロック図を以下に示します。

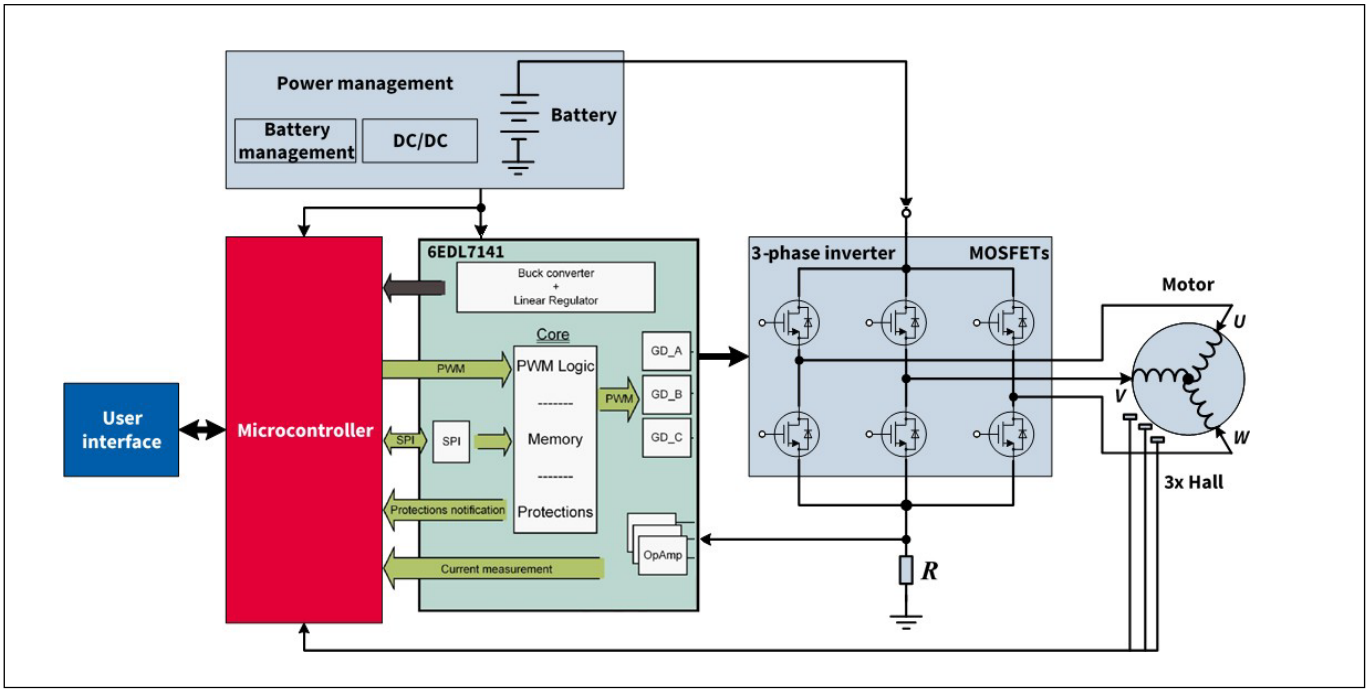

図 3 概略システムブロック図

例としてモーターのデータシートにおける、24 Vの電源電圧で測定した場合のトルク対回転速度のプロットを以下に示します。青い部分は、ステーター コイルが過度に発熱することなく、モーターを安全に使用できる領域を示しています。

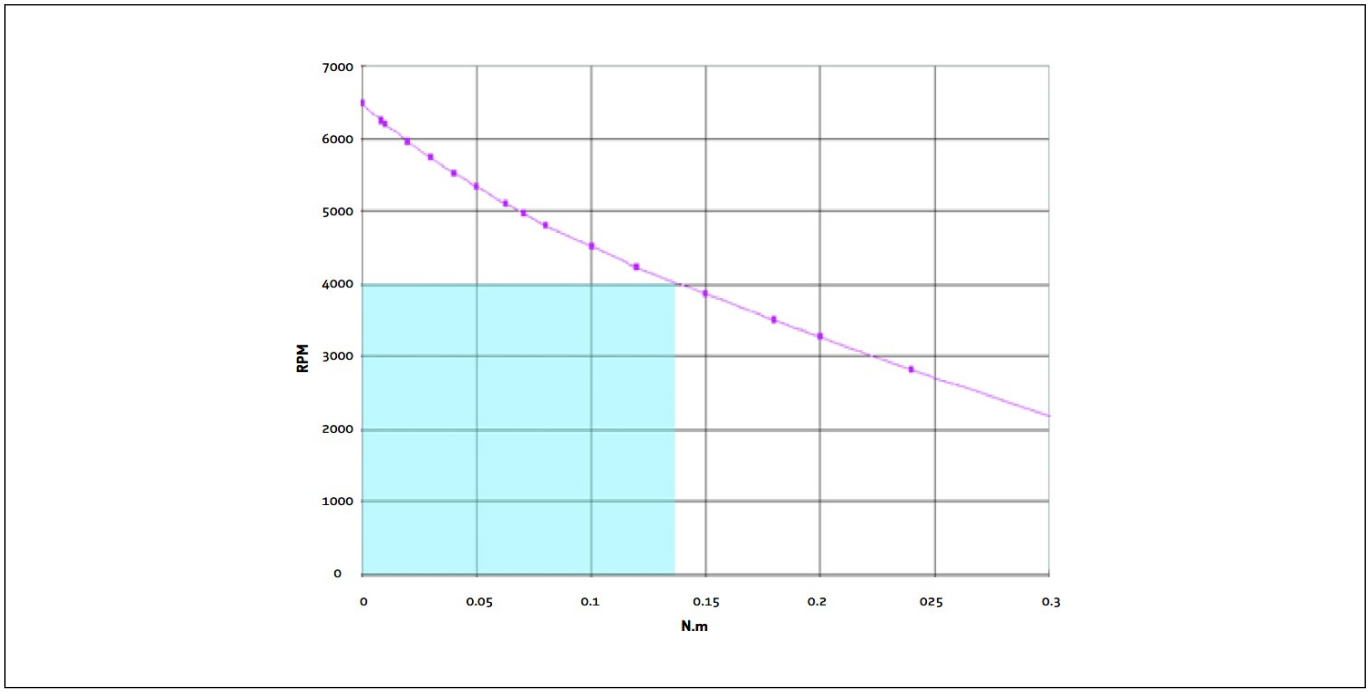

図 4 BLDCモーターの例における回転速度-トルク曲線

1.3 6EDL7141の機能概要

6EDL7141は、ブラシレスDCまたは永久磁石同期モーター駆動システム向けの48ピンVQFNパッケージの3相スマート ゲート ドライバーです。Infineon XMC1400シリーズなどのマイクロコントローラーと連動して動作するように設計されています。本製品は、複数のPWMモードで動作可能な設定可能な3相ハーフブリッジゲートドライバー、内蔵DC-DC同期降圧コンバーター、低ドロップアウト リニア電圧レギュレーター、および設定可能な高精度電流センスアンプから構成されています。また、PCベースのGUIとマイクロコントローラーインターフェースにより、様々な設定を行うことができます。コンフィギュレーション設定は、内蔵のワンタイムプログラマブルメモリーに保存することにより、恒久的なものにすることができます。

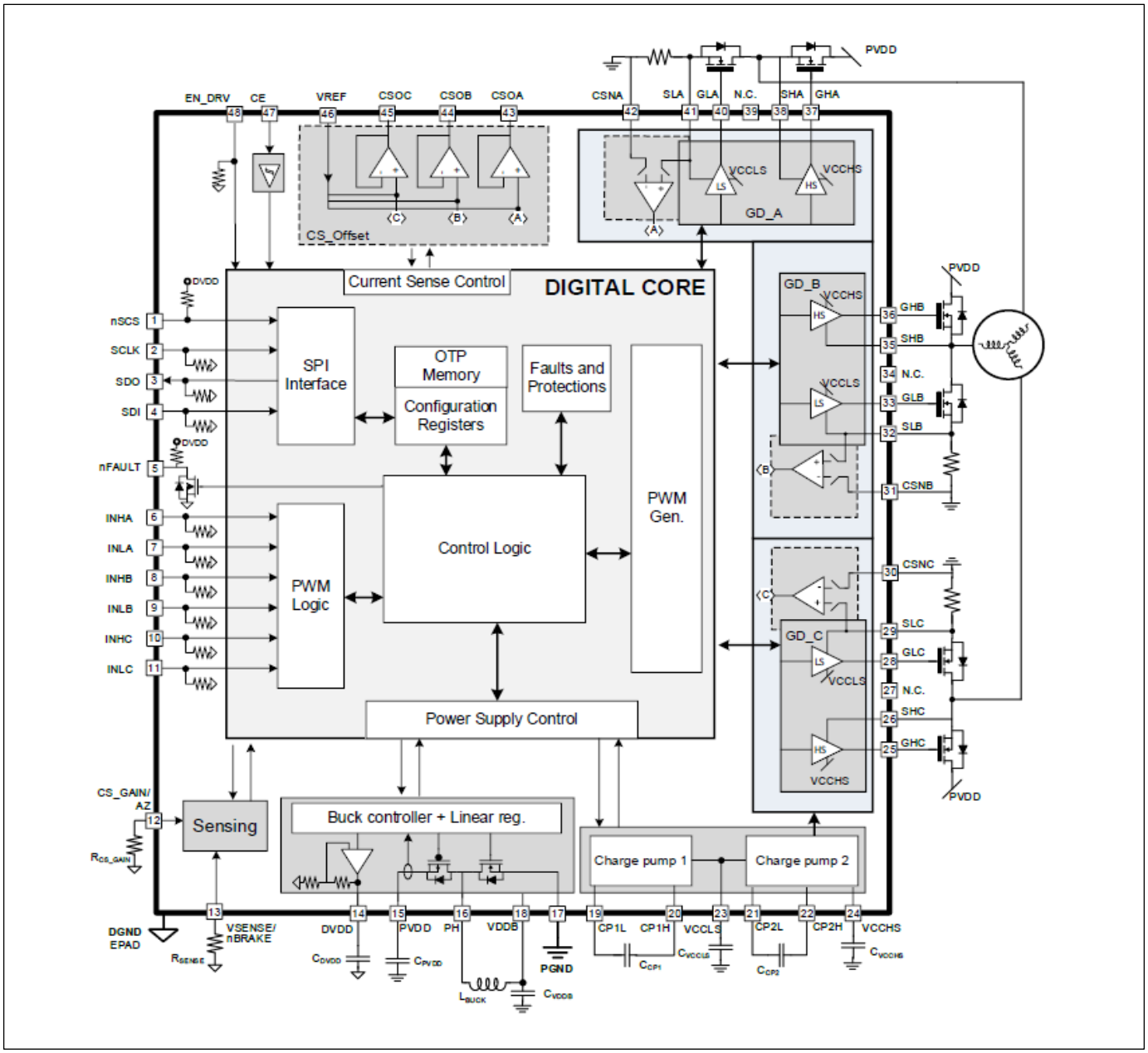

図 5 6EDL7141 内部ブロック図

マイクロコントローラーはSPIを使用して6EDL7141と通信し、設定を行います。マイクロコントローラーからのPWM信号がゲート駆動制御パルスとなり、このパルスはいくつかの異なる方法でデコードすることができます。6EDL7141は、3相インバーターのローサイドとハイサイドのMOSFETにゲート駆動パルスを供給します。ゲート駆動出力電圧 (PVCC) は7 V～15 Vの間で数段階に選択でき、スイッチングプロセスのいくつかの時間領域におけるゲートドライブ電流の設定により、EMIとスイッチオフ過渡応答を最小化するためにスイッチオンとスイッチオフに対するプロファイルを最適化することが可能です。これにより、抵抗およびダイオードのゲート駆動ネットワークも不要になります。保護信号と相電流測定値は、6EDL7141からマイクロコントローラーのデジタル入力またはアナログ入力に接続することが可能です。
6EDL7141は、3つの高精度電流センスアンプが統合されており、シャント抵抗を介してインバーターの電流を測定することができます。シングルシャント、ダブルシャント、トリプルシャントの測定に対応しています。各電流センスアンプは、個別に有効にすることができます。ゲインとオフセットは内部で設定され、ユーザー インターフェースから設定することができます。出力バッファを追加することで、センスアンプ出力に可変オフセット電圧を加えることができます。このオフセット電圧は、内部生成レベルをプログラミングするか、VREF入力ピンに外部電圧を加えることで4種類の値に設定でき、電流シャントの負の電流も測定することが可能です。
正の過電流コンパレーターは、正のシャント電圧に対して、モーター巻線の過電流状態を検出します。このコンパレーターを使用して、PWMサイクル バイ サイクルのパルス トランケーションを適用し、ゲートドライブを終了させ、最大モーター電流を制限することが可能です。また、負の過電流コンパレーターを追加して、負のシャント電流に対するモーター巻線の過電流状態を検出します。過電流コンパレーターのしきい値は内蔵DACにより設定されます。

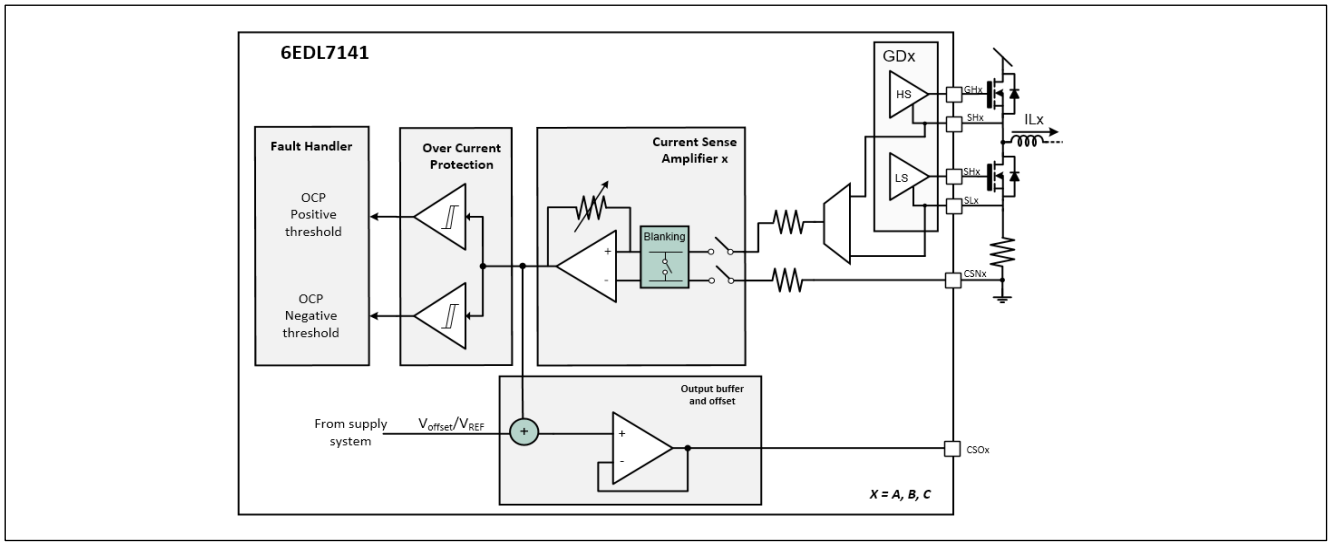

図 6 6EDL7141 電流センスアンプとコンパレーター

また、6EDL7141は、同期整流型降圧レギュレーターを使用した完全なパワーシステムのインフラを備えています。バッテリー電圧を効率的に内部電圧に変換するもので、ゲート駆動電圧の設定に応じて6.5 V、7 V、8 Vに設定され、最大300 mAを供給することが可能です。外付け部品として必要なのは、インダクターとコンデンサーのみです。降圧型レギュレーターはリニアレギュレーターに電源供給し、起動時に読み取りされた外付け抵抗値の値に応じて設定された、ノイズの少ない3.3 Vまたは5 Vをデジタル回路とマイコンに供給することが可能です。
降圧レギュレーターから供給されるローサイドおよびハイサイドのチャージポンプを内蔵し、ゲートドライバー電源電圧を供給することで、最大100%のデューティサイクルを実現しました。各チャージポンプは、外付けのスイッチトキャパシター (ローサイドはCP1、ハイサイドはCP2) を使用して、降圧コンバーター出力からゲートドライバー バイアス電源に電荷を移動します。VCCLS と VCCHS に電荷を転送します。

VCCLSはシステムのゼロ電圧レールに対し、VCCHSはシステムの正電源レールに対して基準としています。従来のハーフ ブリッジ ドライバーとは異なり、6EDL7141は高度なハイサイド ドライバー方式を採用しているため、各相に個別のフローティング電源を供給しなくても、VCCHSが3相すべてのハイサイド ゲート ドライバーにスイッチオン電圧と電流を供給することが可能です。チャージ ポンプが正しく動作するためには、スイッチングコンデンサーとバイアス サプライ コンデンサー (CVCCLSとCVCCHS) の値を、データシートの指示通りに選択する必要があります。チャージポンプのクロック周波数は、195.3 kHz、390.6 kHz、781.3 kHz、1.56 MHzから選択可能で、EMIを低減するために周波数変調をオプションで用意しています。

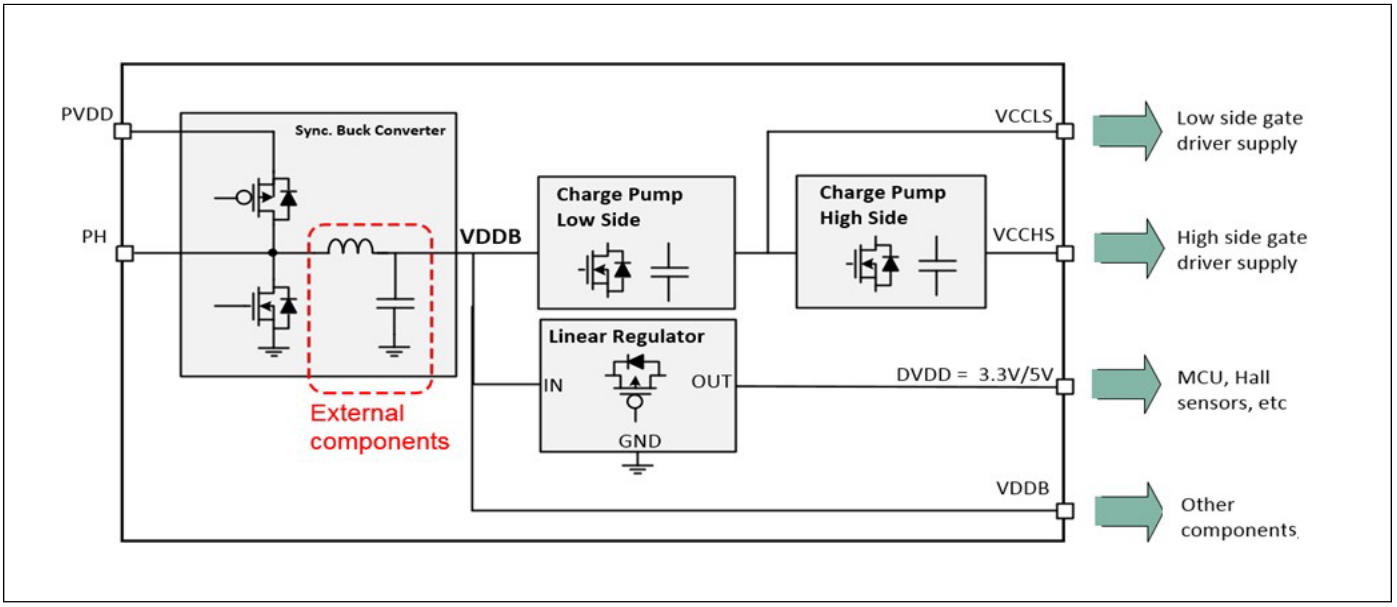

図 7 6EDL7141 統合型パワーサプライ

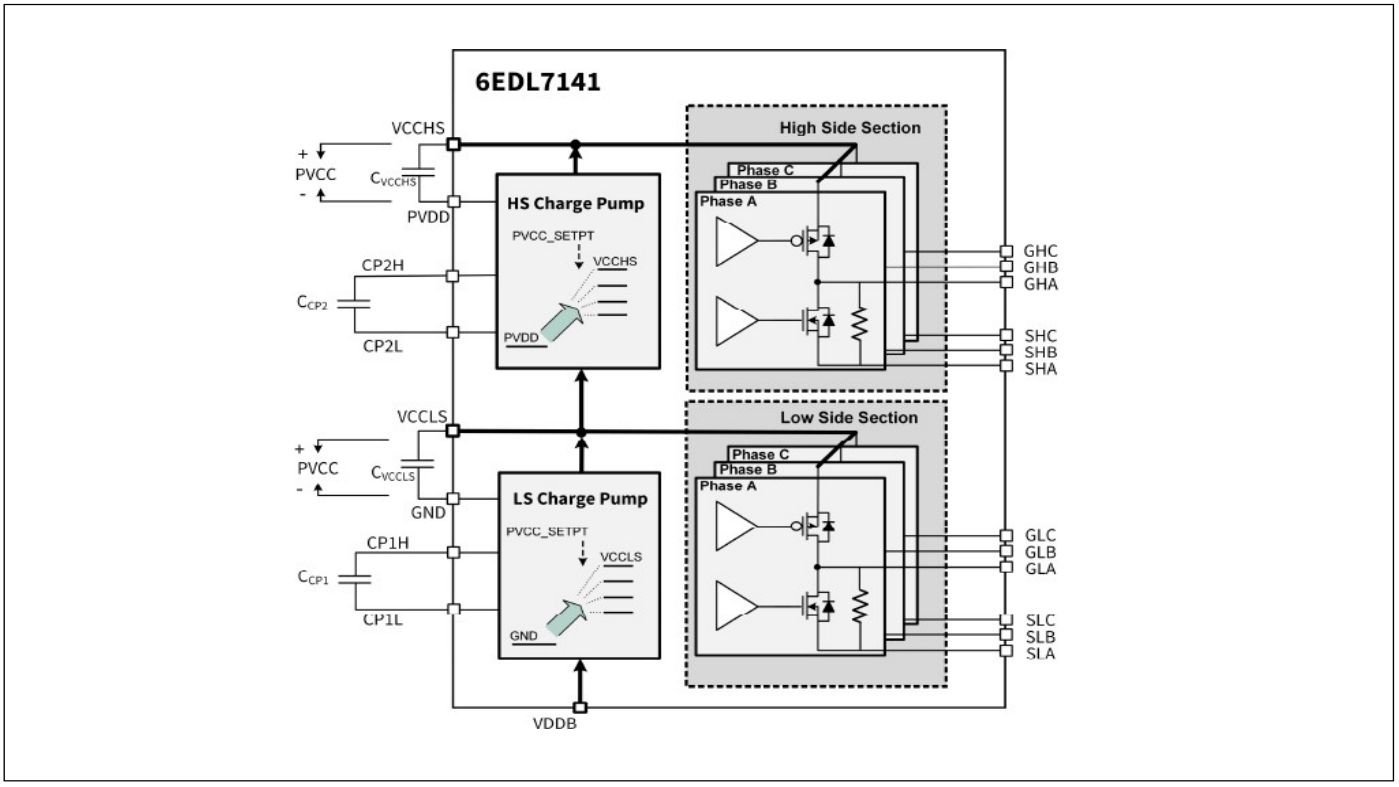

図 8 チャージポンプとゲートドライバーを統合した6EDL7141

6EDL7141 は複数の PWM モードに対応しており、以下のように選択が可能です。

- 6PWM
- 3PWM
- 1PWM and commutation pattern
- 1PWM with Hall sensor commutation
- 1PWM mode with Hall sensor commutation and alternating recirculation.

これにより、設計者はマイコンを柔軟に選択することができ、異なるアプリケーションに対応できます。
6EDL7141では、1PWMおよび3PWMモードにおいて、デッドタイムを設定することが可能です。

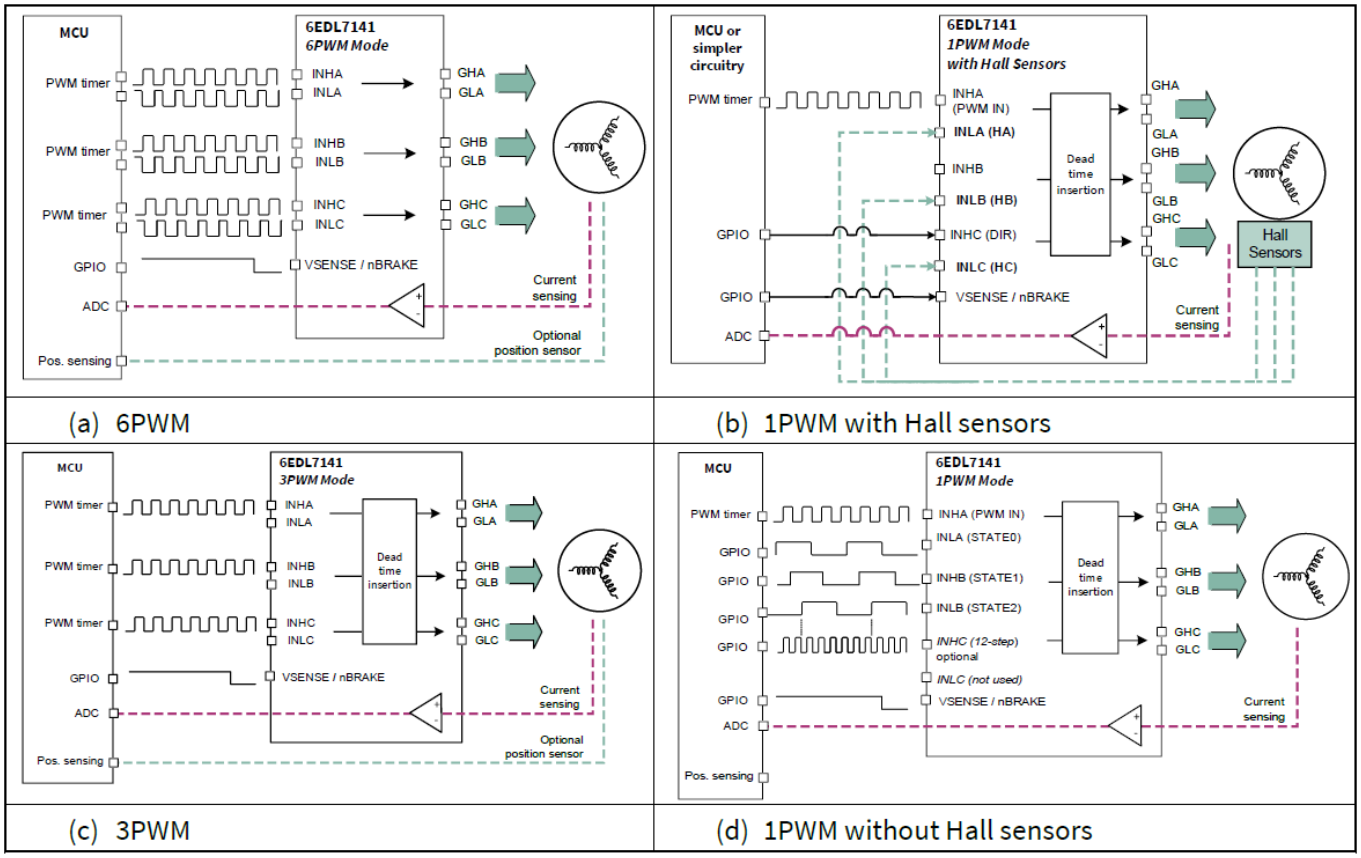

図 9 6EDL7141がサポートするPWMスイッチングモード

EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH評価ボードは、付属のファームウェアを使用して6PWMモードで動作します。
また、6EDL7141には、以下のような保護機能が搭載されています。

- 内部電源、インバーター各相の過電流保護機能
- 入力バス電圧およびデジタル電源電圧の低電圧ロックアウト機能
- 過熱検知、警告、遮断機能
- 設定可能なウォッチドッグタイマー
- ホールセンサー入力に基づくローターロック検出、メモリー異常検出

2 仕様

正常動作時の入出力:

- DC 入力電圧 12 V～24 V、公称電圧18 V
- 最大入力電流30 A
- 出力電圧 三相台形 (6段) 制御
- 各相の最大出力電流 25 A_{RMS}
- 最大連続出力 500 W

制御方式:

- 台形/6ステップ/矩形波制御、ホールセンサー搭載
- スイッチング周波数 20 kHz
- 単電流シャント

保護機能:

- 入力ヒューズ
- 逆入力保護機能
- 過電流保護
- サーマルシャットダウン

最高部品温度:

周囲温度30°Cの場合、許容される最大部品温度は以下の通りです。

- 100°C以下の抵抗器
- セラミック コンデンサー、フィルム コンデンサー、電解コンデンサー 100°C以下
- MOSFET トランジスター、ダイオード 100°C以下
- 100°C以下のIC

評価ボード寸法:

最大幅3.0インチ/76.2mm、最大長4.0インチ/101.6mm

※注意: 本製品のテストは、資格のあるエンジニアや技術者のみが行ってください。

3 回路図

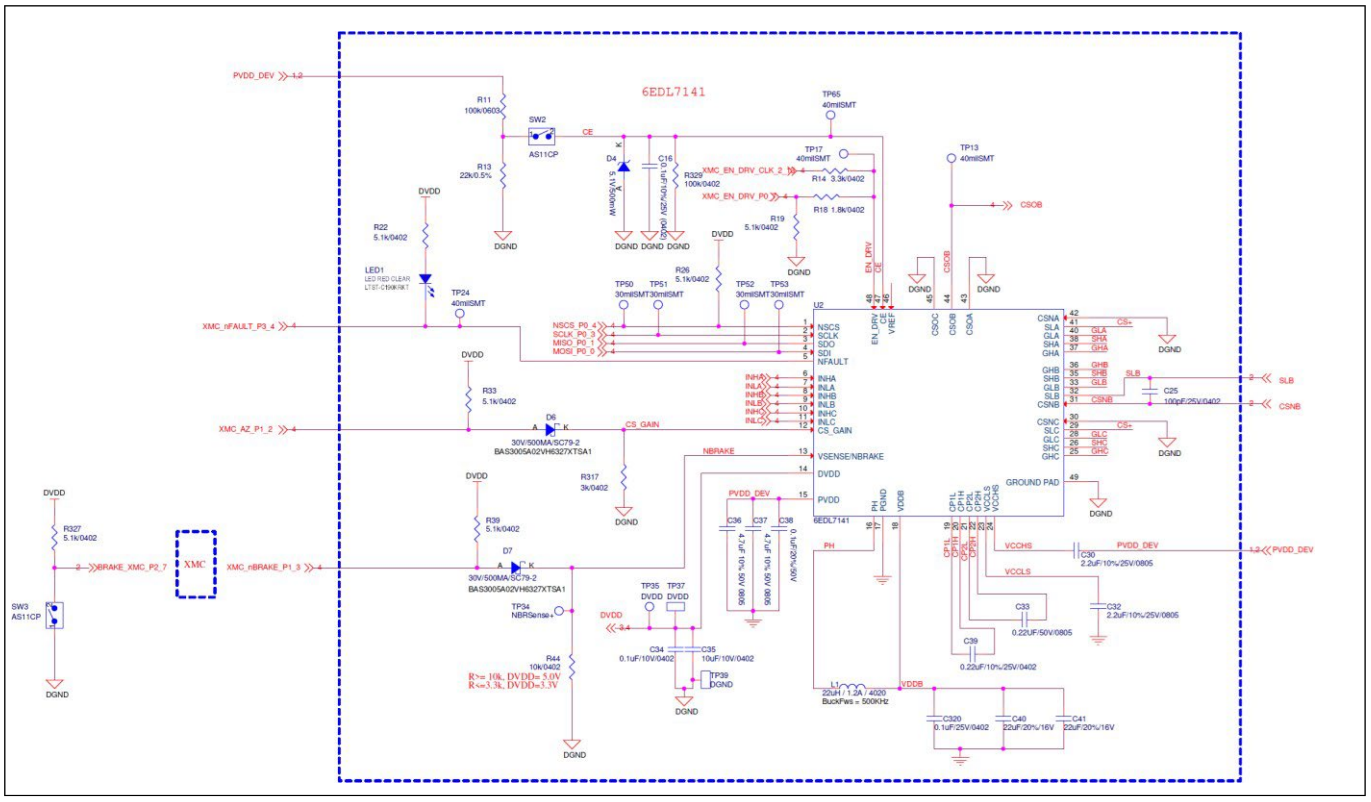

図 10 EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH回路図 - 6EDL7141ゲートドライバー部

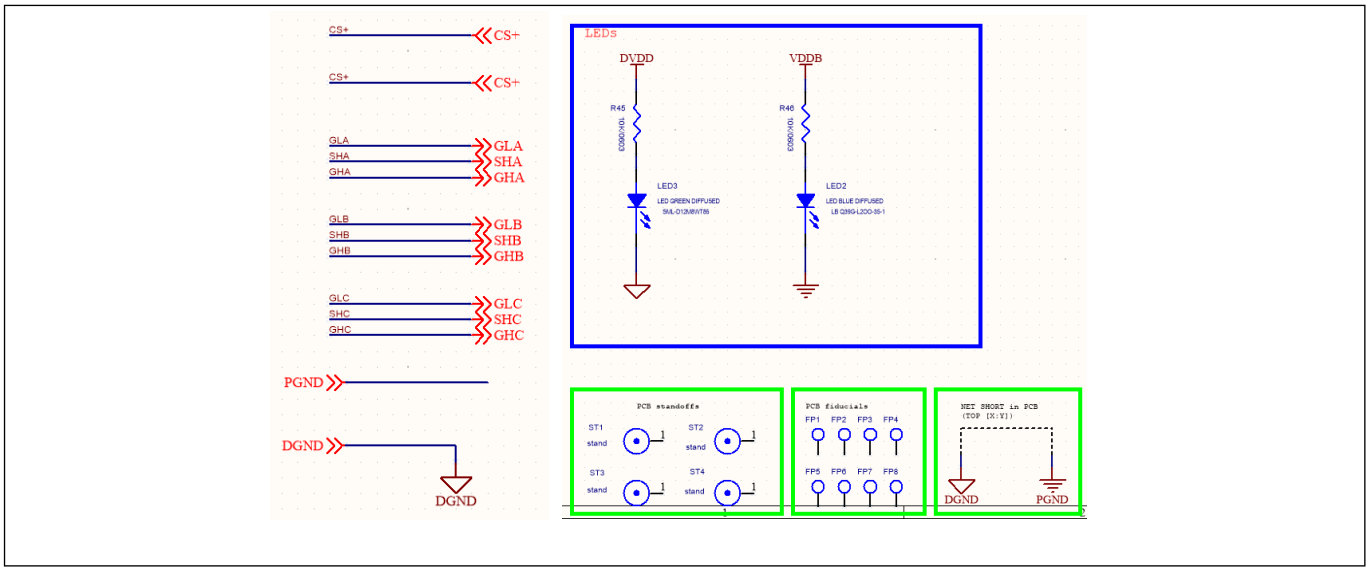

図 11 EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH 回路図 – 電源 LED インジケーターと接続部

回路図

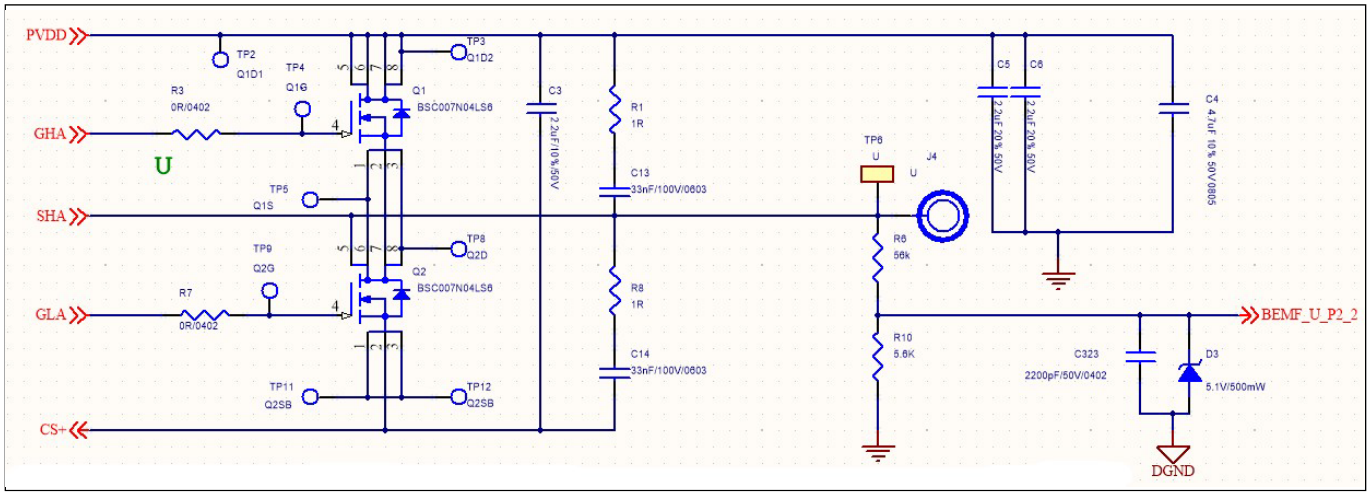

図 12　EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH回路図 - パワーステージ、フェーズ "U"の場合

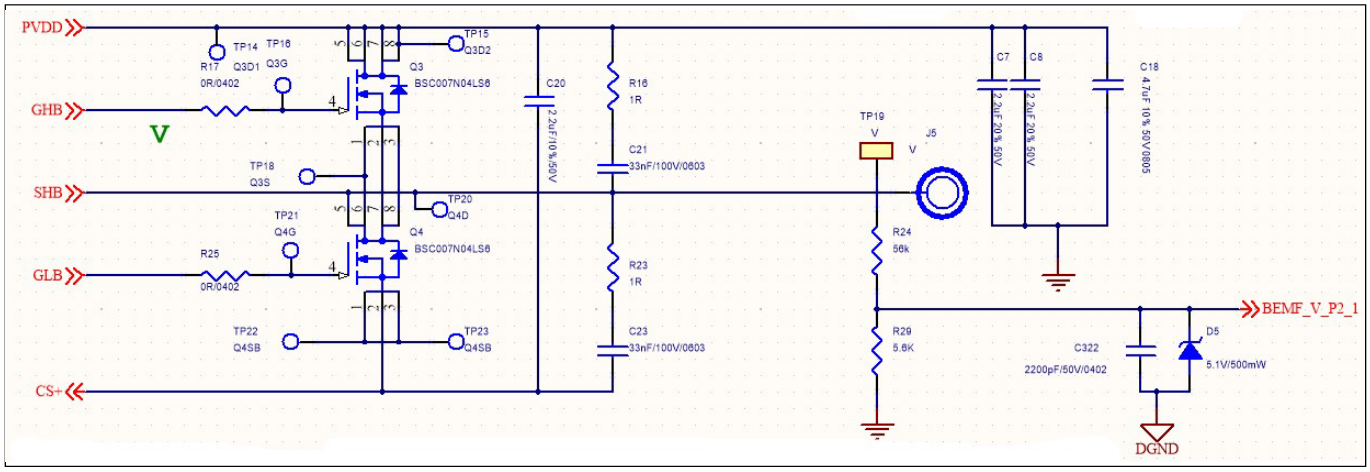

図 13　EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH の回路図 - パワーステージ、フェーズ "V" の場合

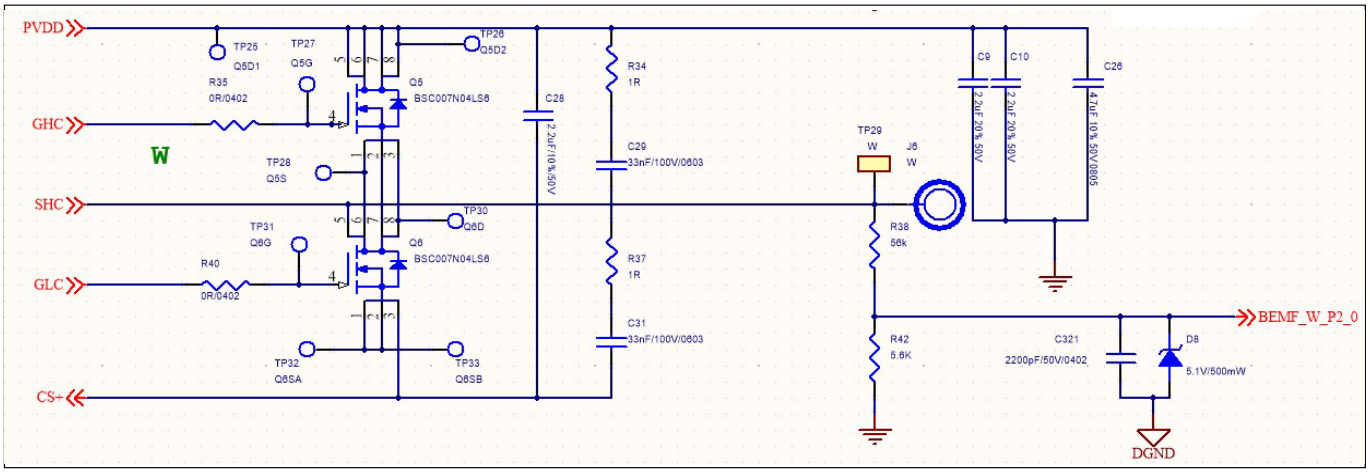

図 14　EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH の回路図 - パワーステージ、位相 "W" の場合

回路図

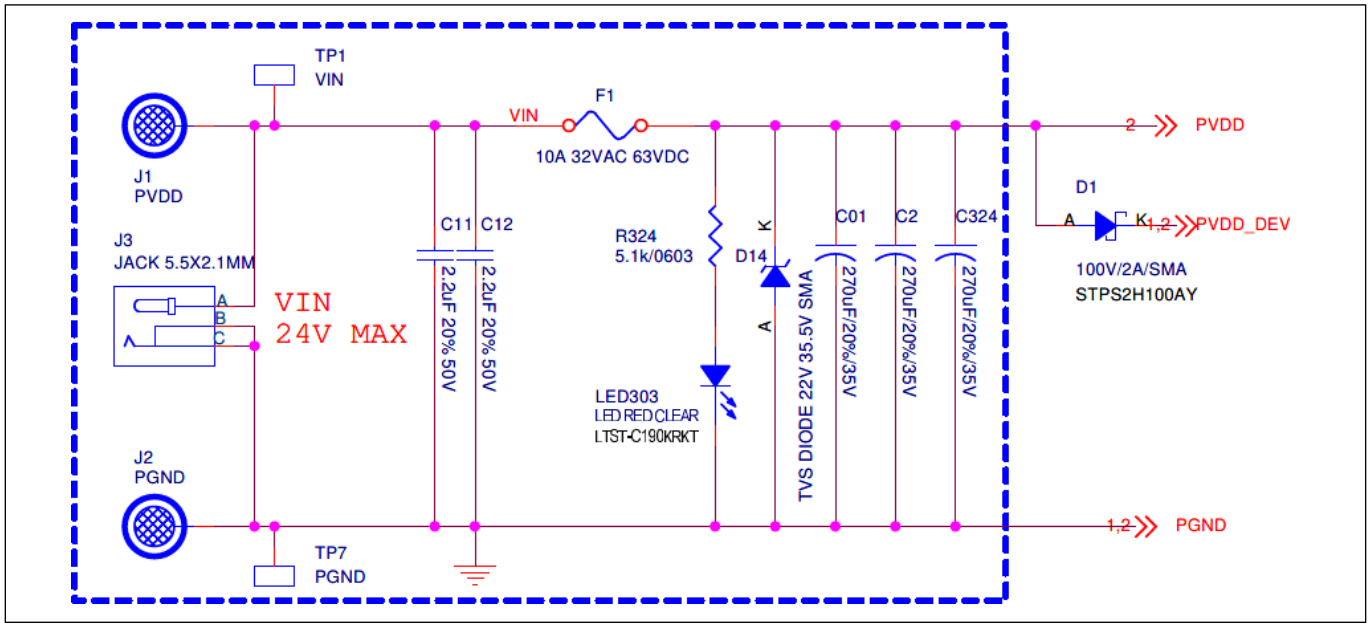

図 15　EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH 回路図 - DC入力

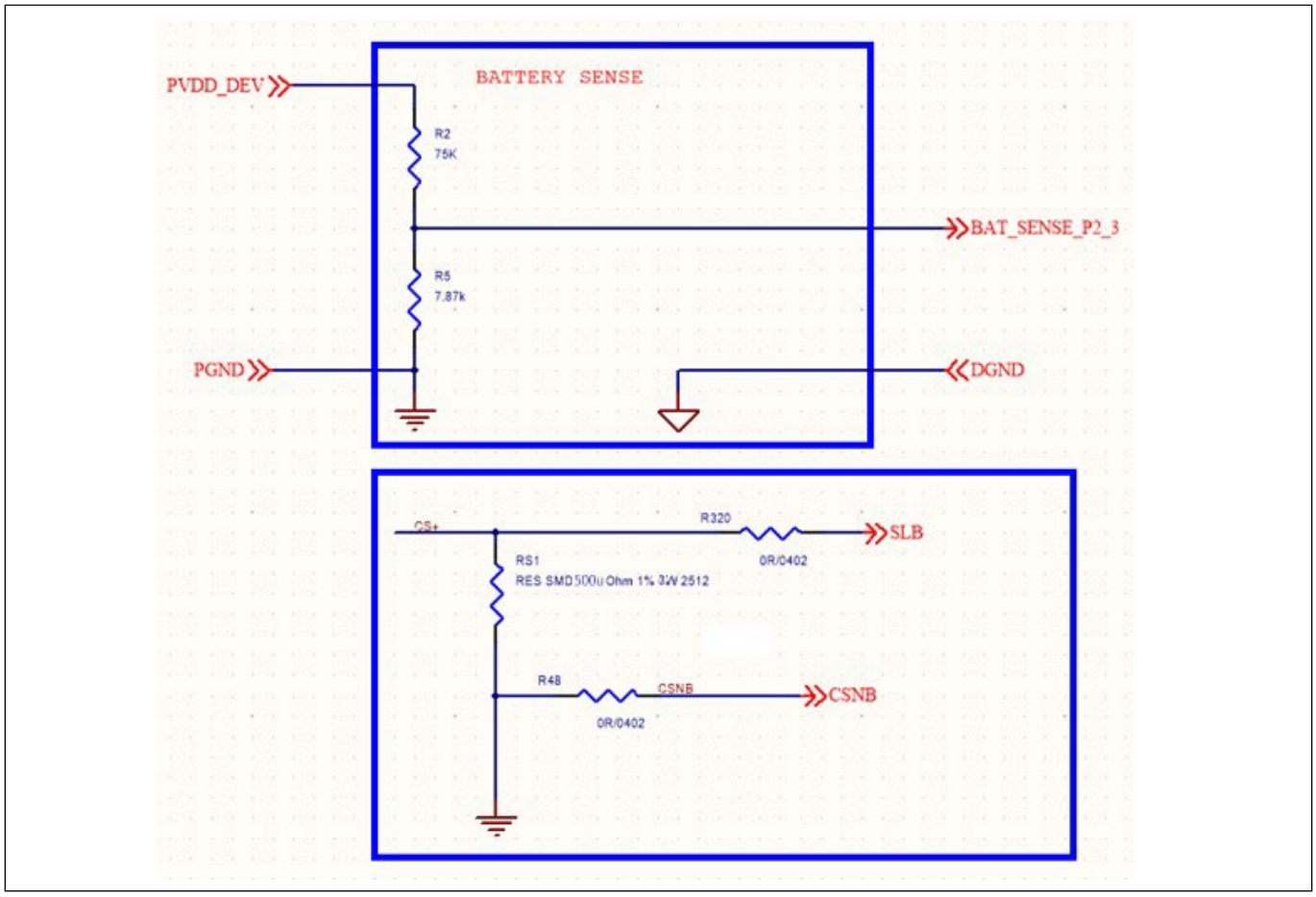

図 16　EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH の回路図 - 電圧と電流の検出

回路図

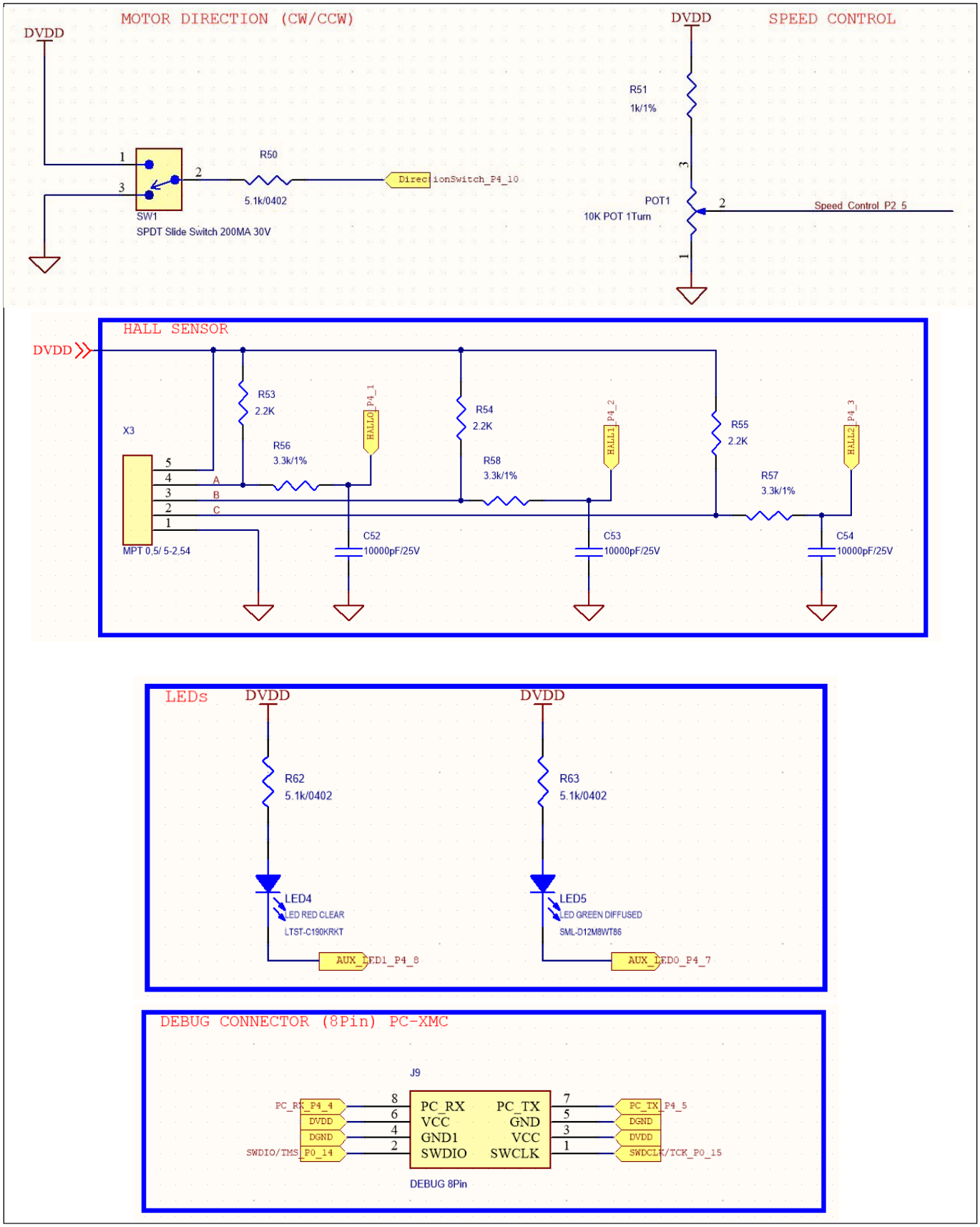

図 17 EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH の回路図 - 方向スイッチ、速度制御、ホールセンサー入力、LED インジケーター、外部デバッガー

回路図

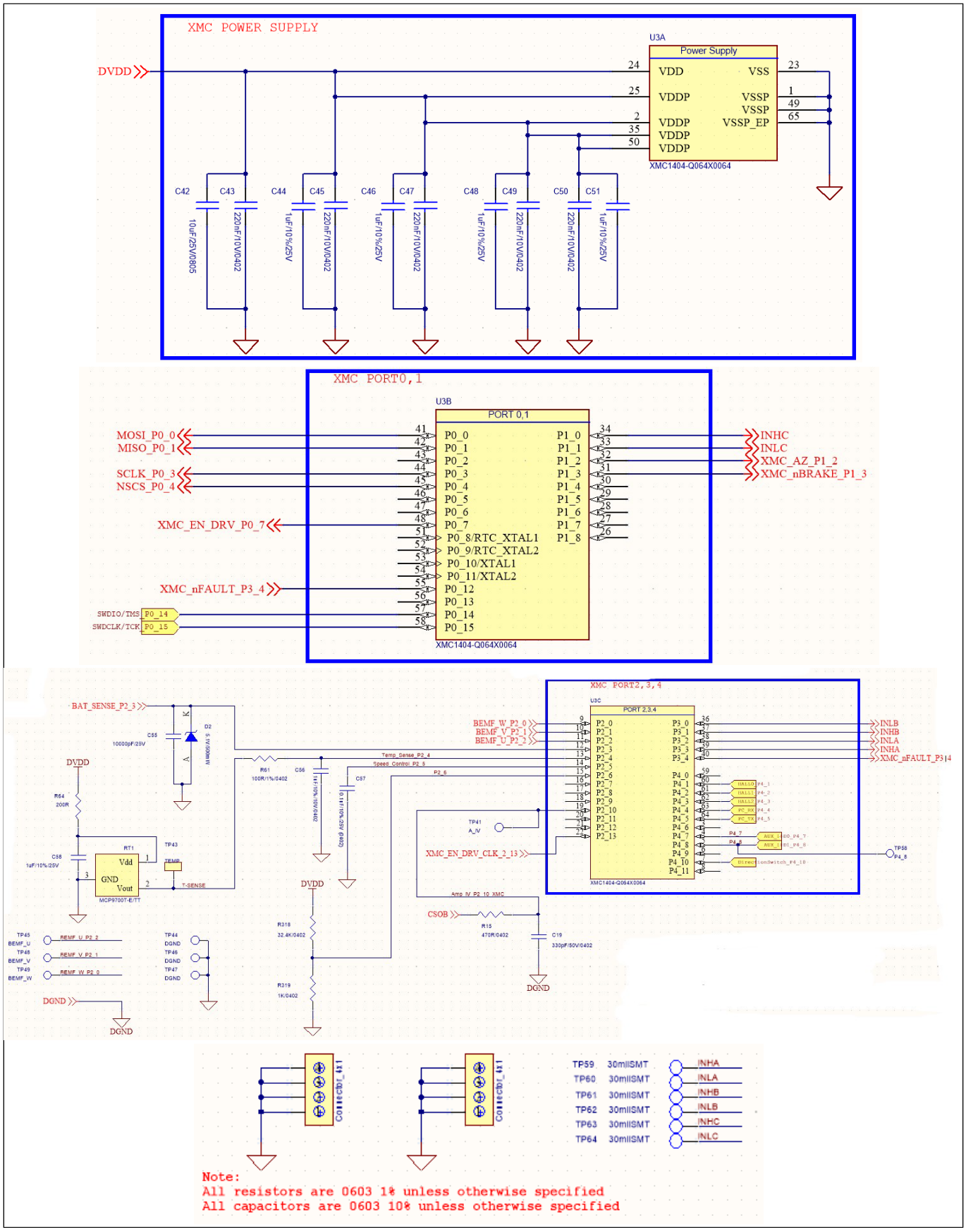

図 18 EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH 回路図 - XMC1404 メイン コントローラー電源と接続

回路図

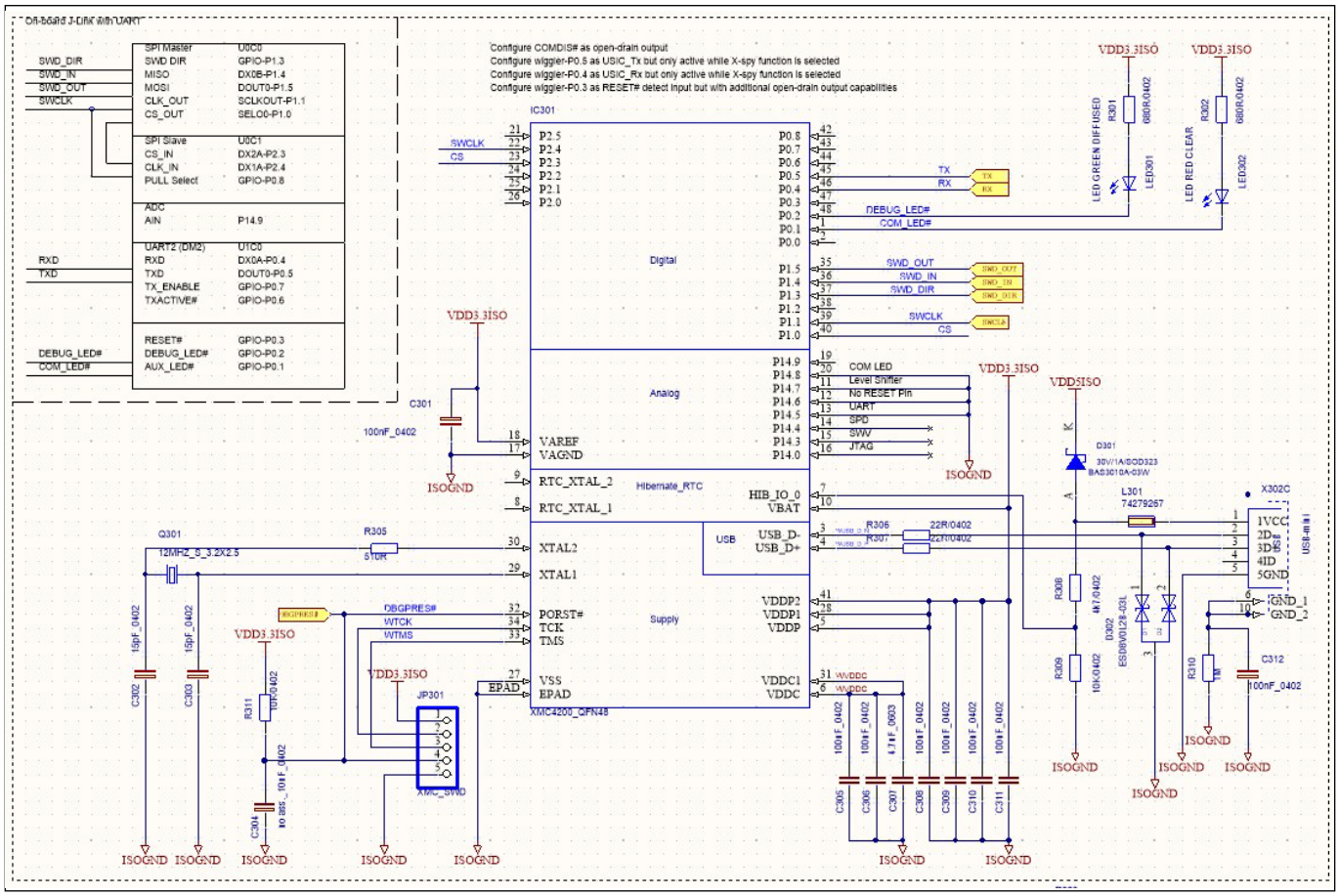

図 19 EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH 回路図 - デバッガーコントローラー部

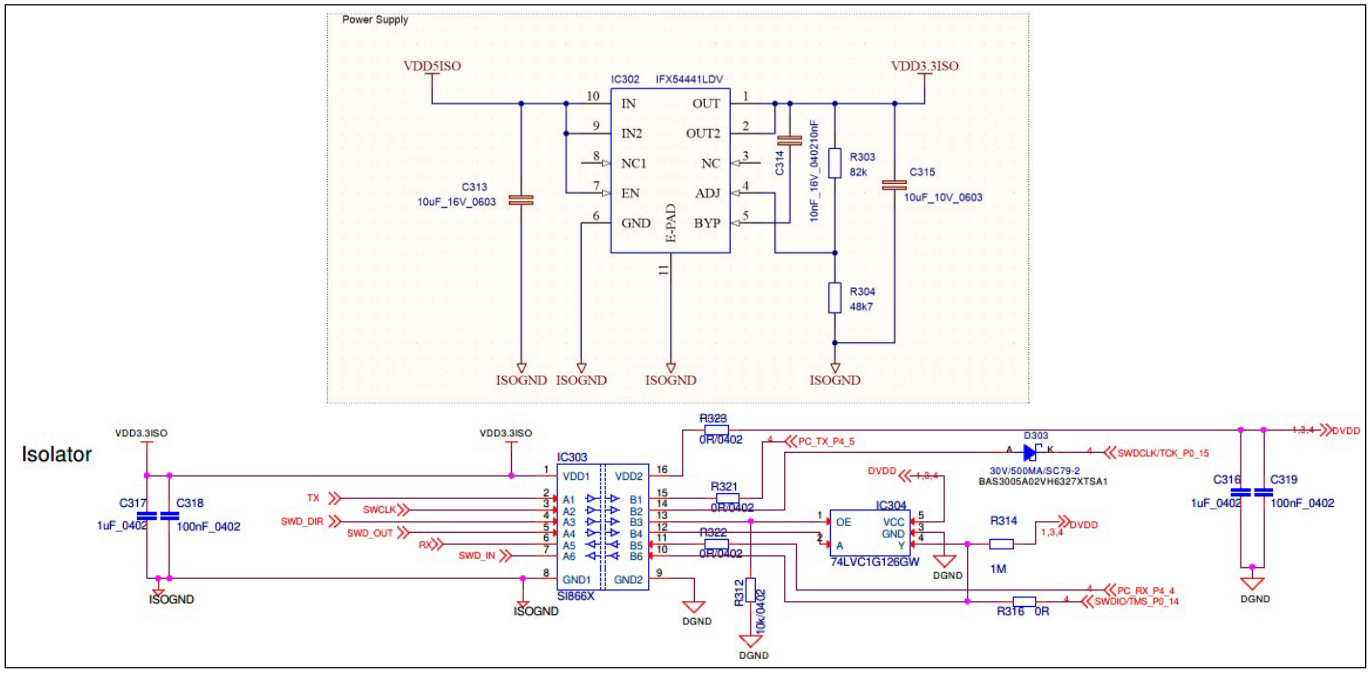

図 20 EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH 回路図 - デバッガー電源とアイソレーター

4 ハードウェアの機能説明

ホールセンサーによる矩形波制御の主なハードウェア要素は、三相インバーター電源ステージ、6EDL7141三相スマート ゲートドライバー、ARM® Cortex®-M0搭載XMC1400シリーズ32ビットマイコンです。

4.1 三相インバーターステージ

三相インバーターのスイッチング素子には、バッテリー駆動の電動工具用途に最適化したBSC007N04LS6 (OptiMOS™ 6 40 V 0.7 mΩ 5x6 PQFN) パワーMOSFETを採用しています。デモボードは、以下のPWM方式をサポートし、ファームウェアで選択することができます。いずれの場合も、PWMは固定周波数で動作し、デューティサイクルを調整して、各固定子巻線に印加される平均電圧を制御します。巻線のインダクタンスによりPWM周波数成分のほとんどが除去され、わずかなリップルが残ります。

表 1 対応するPWM方式

変調方式	記述
ローサイドモジュレーション	ローサイドスイッチに変調が加わる
ハイサイド変調	ハイサイドスイッチに変調が加わる
同期整流によるハイサイド変調	ハイサイドスイッチに変調が加わり、ローサイドスイッチには相補的なパルスが加わる。

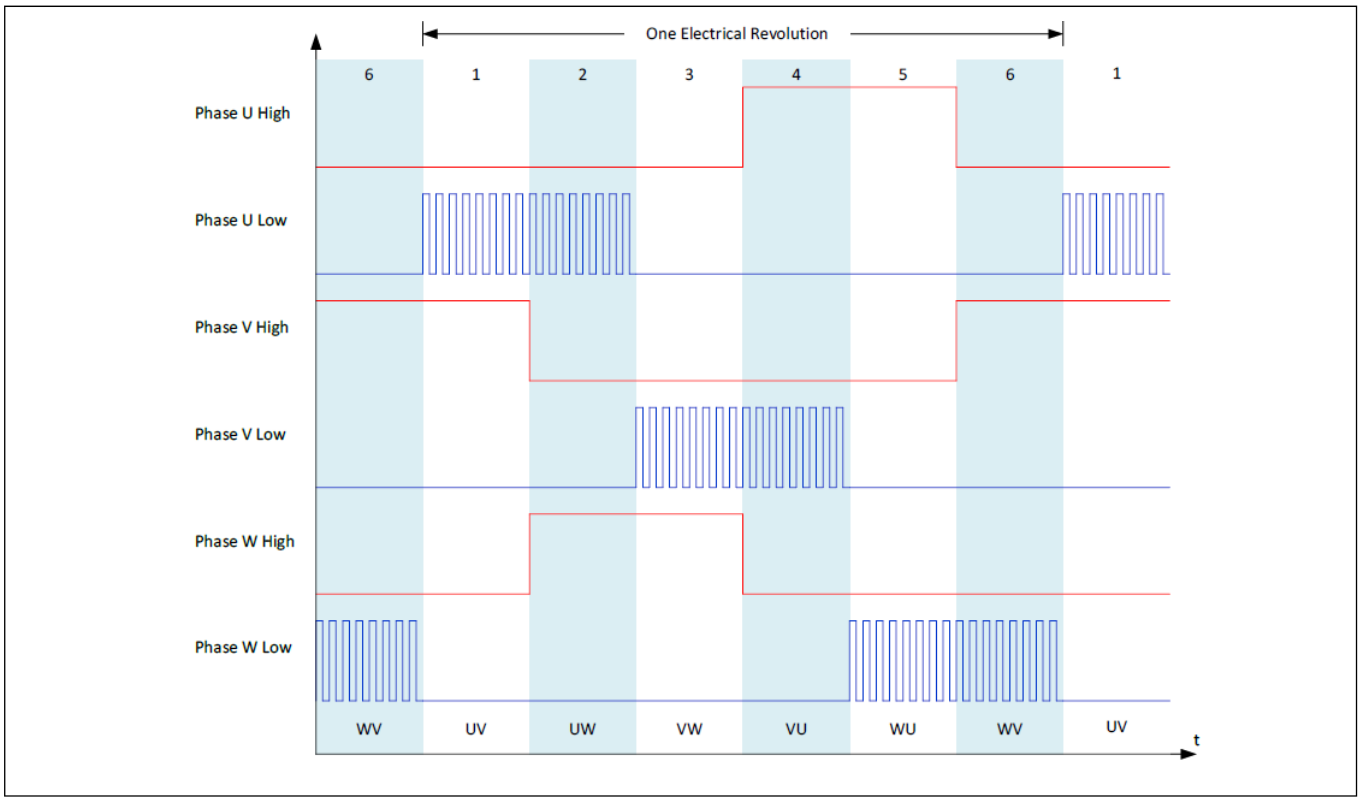

図 21 ローサイド モジュレーション

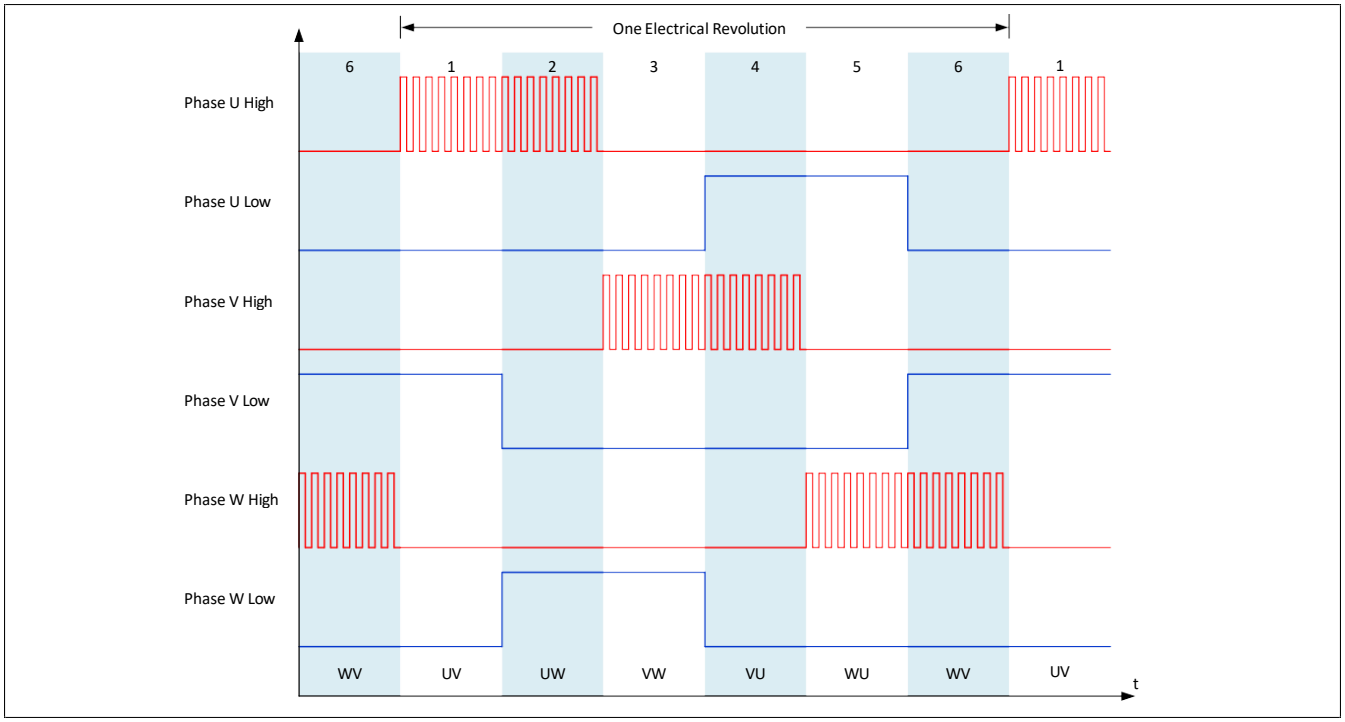

図 22　ハイサイド変調

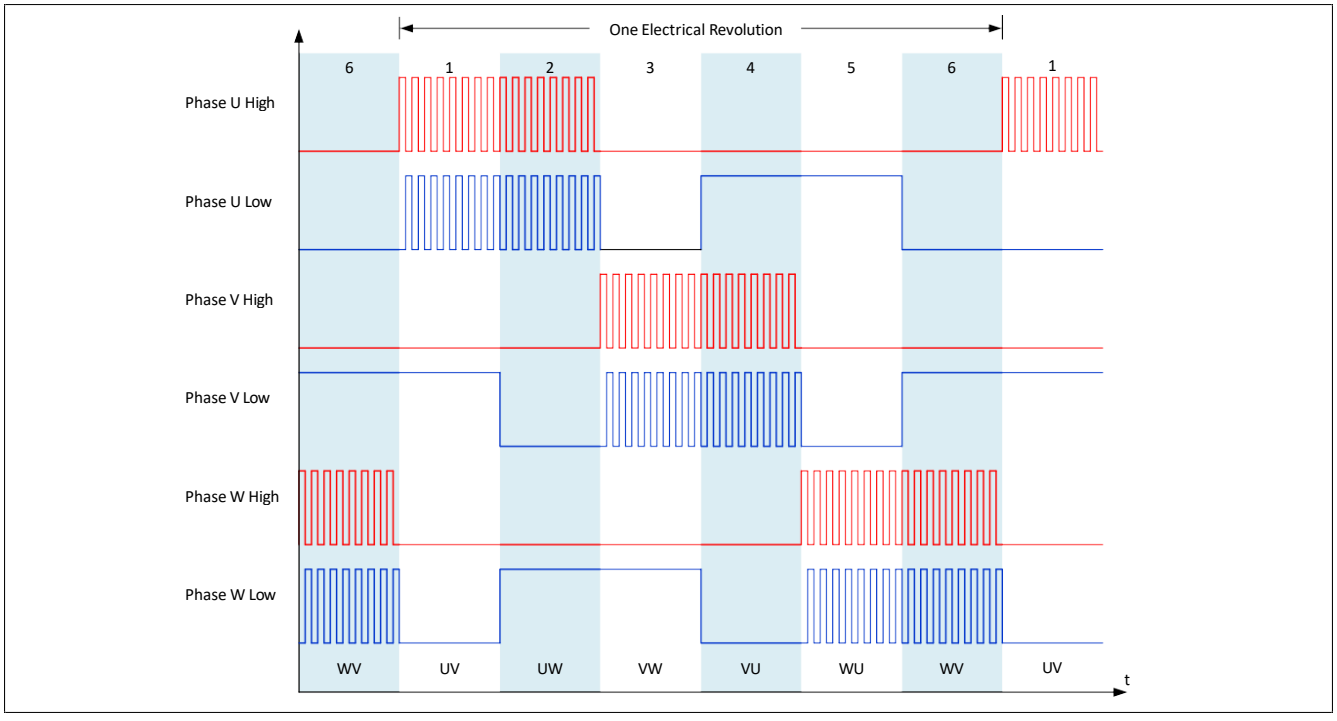

図 23　同期整流によるハイサイド変調

同期整流によるハイサイド変調時は、スイッチング遷移時に各インバータ相のハイサイドとローサイドのMOSFETが同時にONにならないように、PWM信号の立ち上がりと立ち下がりの間にスイッチングデッドタイムを挿入しています (シュートスルー条件)。各MOSFETのボディダイオードは、MOSFETがオフの時に電流を流します。

6EDL7141_BLDC_1SH デモボードでは、オプションでヒートシンクを基板下に取り付け、MOSFET から熱を取り除くことができるため、過熱することなくモーターの高出力駆動が可能になります。
通常、ホールセンサーを使用したブロック整流では、1つのシャント抵抗（この場合はRS1）を使用してDCリンクの電流を検出します。これは、ローサイドで感知する各相の電流を組み合わせたものです。

4.2 6EDL7141スマートゲートドライバー

各相のハイサイドおよびローサイドMOSFETへの最適なゲート駆動パルスは、6EDL7141スマートゲートドライバー (U2) によって提供されます。ロジック レベルのスイッチングPWMパルスは、XMC1404マイクロコントローラー (U3) から6EDL7141に供給されます。ハイサイドおよびローサイドのゲート ドライバーにより、最大100パーセントまでの全デューティ サイクル範囲での動作が可能です。ゲート駆動電圧は、7 V、10 V、12 V、15 Vなど、さまざまなレベルで設定できます。チャージポンプの利点の1つは、バッテリー電圧が低下しても電圧レベルを維持できるため、標準的なゲートレベルMOSFETを使用できることです。

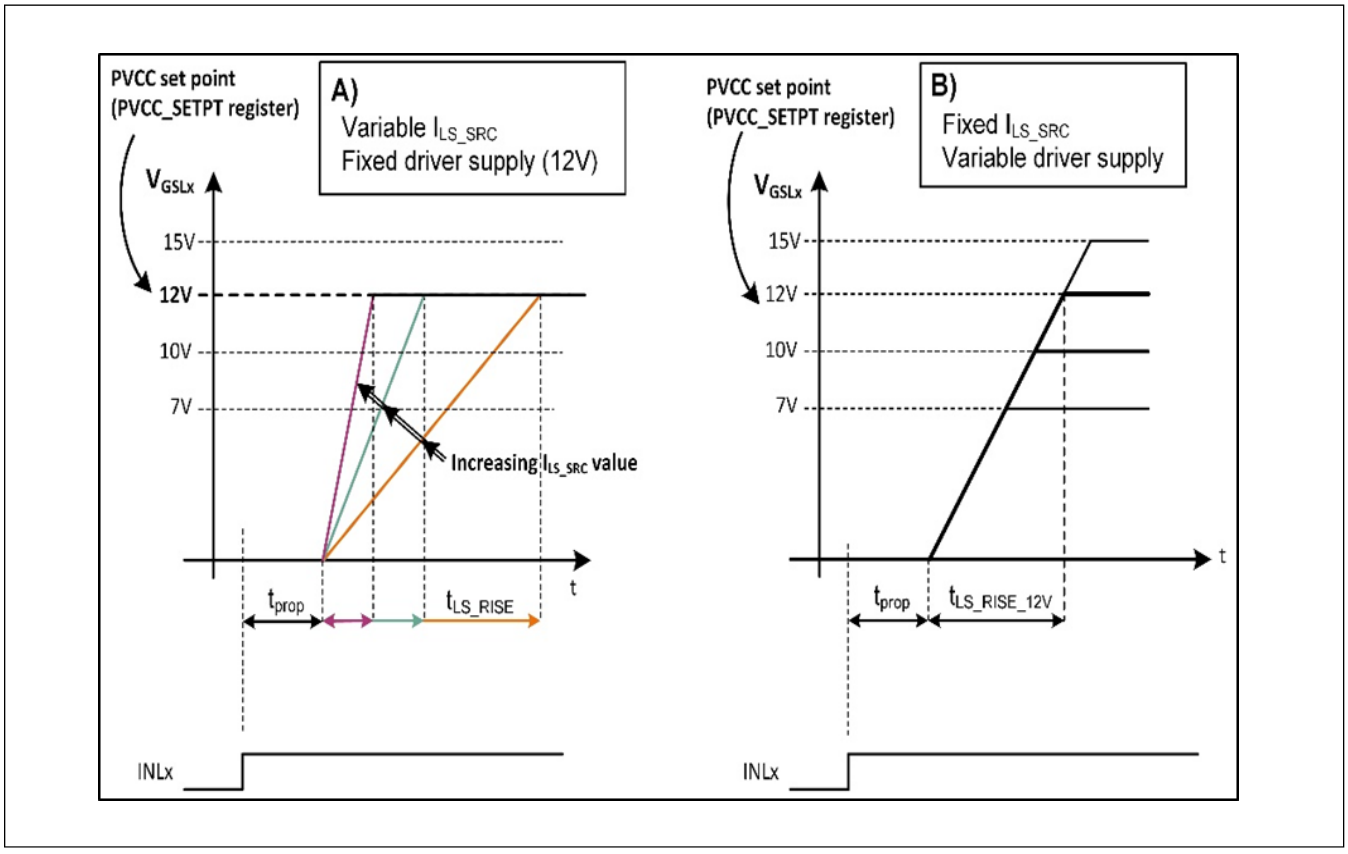

図 24 6EDL7141 のゲート駆動制御

ドレイン ソース間の上昇時間および下降時間の制御は、ドライブシステムの最適化にとって最も重要なパラメーターの1つであり、スイッチング損失、デッドタイムの最適化、MOSFETのアバランシェの可能性につながるドレイン電圧リンギングなどの重要な要素に影響します。また、ゲート駆動の正しい設定は、EMIの発生を最小限に抑えることにもつながります。6EDL7141は、駆動信号のスルー レートを制御することが可能で、スイッチ オンとスイッチ オフのプロセスにおいて、異なる時間セグメントでゲート駆動のシンク電流とソース電流を調整することにより、ドレイン-ソース間電圧の上昇と下降のスルーレートを制御することができます。これにより、ゲート駆動回路で一般的に使用されているダイオード抵抗のネットワークを省略することができます。また、多くの場合、ゲート抵抗も不要となり、部品点数の削減と同時に、回路レイアウトの簡素化 最適化が可能となります。

4.2.1 ゲートドライバーの構成

4.2.1.1 ゲート駆動電流とタイミング

GUI ツールを使用し、SPI アクセス可能なレジスターを介して、以下のパラメーターでゲートドライバー電流および タイミングを設定することができます。

表 2 ゲート駆動パラメーター[1]

パラメーター	記述	最小	最大
I_{HS_SRC}	ハイサイドMOSFETをスイッチングするためのソース電流値	10 mA	1.5 A
I_{HS_SINK}	ハイサイドMOSFETのスイッチオフ時のシンク電流値	10 mA	1.5 A
I_{LS_SRC}	ローサイドMOSFETをスイッチングするためのソース電流値	10 mA	1.5 A
I_{LS_SINK}	ローサイドMOSFETのスイッチオフ時のシンク電流値	10 mA	1.5 A
I_{PRE_SRC}	ハイサイド、ローサイド両方に対するスイッチング時のプリチャージ電流値	10 mA	1.5 A
I_{PRE_SNK}	ハイサイド、ローサイド両方に対するスイッチオフ時のプリチャージ電流値	10 mA	1.5 A
T_{DRIVE1}	I_{PRE_SRC}が適用される時間の値 ハイとローで設定を共有	0 ns	2.59 µs
T_{DRIVE2}	I_{HS_SRC} と I_{LS_SRC}が適用される時間の値. ハイサイド ドライバーとローサイド ドライバーで設定を共有	0 ns	2.55 µs
T_{DRIVE3}	I_{PRE_SNK} が適用される時間の値 ハイサイド ドライバーとローサイド ドライバーで設定を共有	0 ns	2.59 µs
T_{DRIVE4}	I_{HS_SINK} と I_{LS_SINK} とが適用される時間の値 ハイサイド ドライバーとローサイド ドライバーで設定を共有	0 ns	2.55 µs

図 25に、ゲートドライバーの実装を示します。EVAL_6EDL_7141_TRAP_1SH 評価ボードでは、6PWM モードを使用しており、マイクロコントローラーは、PWM モジュールが生成する INHx 信号と INLx 信号の間に特定のデッドタイムを挿入しています。この駆動方式は、他のPWMモードにも適用可能です。
図の簡略化のため、伝搬遅延は示していません。
マイコンからの入力信号がLowからHighに遷移すると、ゲートドライバーのスイッチオンシーケンスが発生します。ゲートドライバー出力は、まずI_{PRE_SRC}で定義された定電流をT_{DRIVE1}で定義された時間だけ流し、その終了時にMOSFETのゲート電圧が閾値電圧VGS(TH)に到達していなければなりません。T_{DRIVE1}の終了後、すぐにT_{DRIVE2}が開始され、ゲートスイッチ オン シーケンスの次の期間が定義され ます。T_{DRIVE2}中に印加される電流は、駆動されるMOSFETのQSWを充電するための電流を供給するため、MOSFETのdI_D/dtとdV_{DS}/dtの両方を決定することになります。三相モーター駆動構成では、各ハーフブリッジはハイサイドのハード スイッチオンで、連続モードで動作します。相電流によるスナバ コンデンサーの充電に十分なデッドタイム時間がない場合、ローサイドのハード スイッチ オンも発生することがあります。T_{DRIVE2}期間が経過すると、ゲートドライバーは、V_{GS}をプログラムされたPVCC値 ($Q_{OD} = Q_G - Q_{SW} - Q_{G(TH)}$) まで上げるために必要な残りの電荷を供給して、MOSFETの最速フルターンオンを確実にするために、フル電流 (1.5 A) を供給します。
MOSFET のスイッチオフ時にも同様の処理が行われ、T_{DRIVE3} と T_{DRIVE4} のパラメーターにより、プログラムされた放電電流が印加される期間が決定されます。

※注意: スルーレートを調整する場合は、LowからHighへの遷移はT_{DRIVE1}とT_{DRIVE2}の和、HighからLowへの遷移はT_{DRIVE3}とT_{DRIVE4}の和、または両方のデッドタイムが同じ場合はどちらか大きい方のデッドタイムを適切に設定する必要があることに注意してください。

[1] 利用可能な電流値および遅延時間は、6EDL7141データシート[1]の第8項「レジスタマップ」に記載されています。

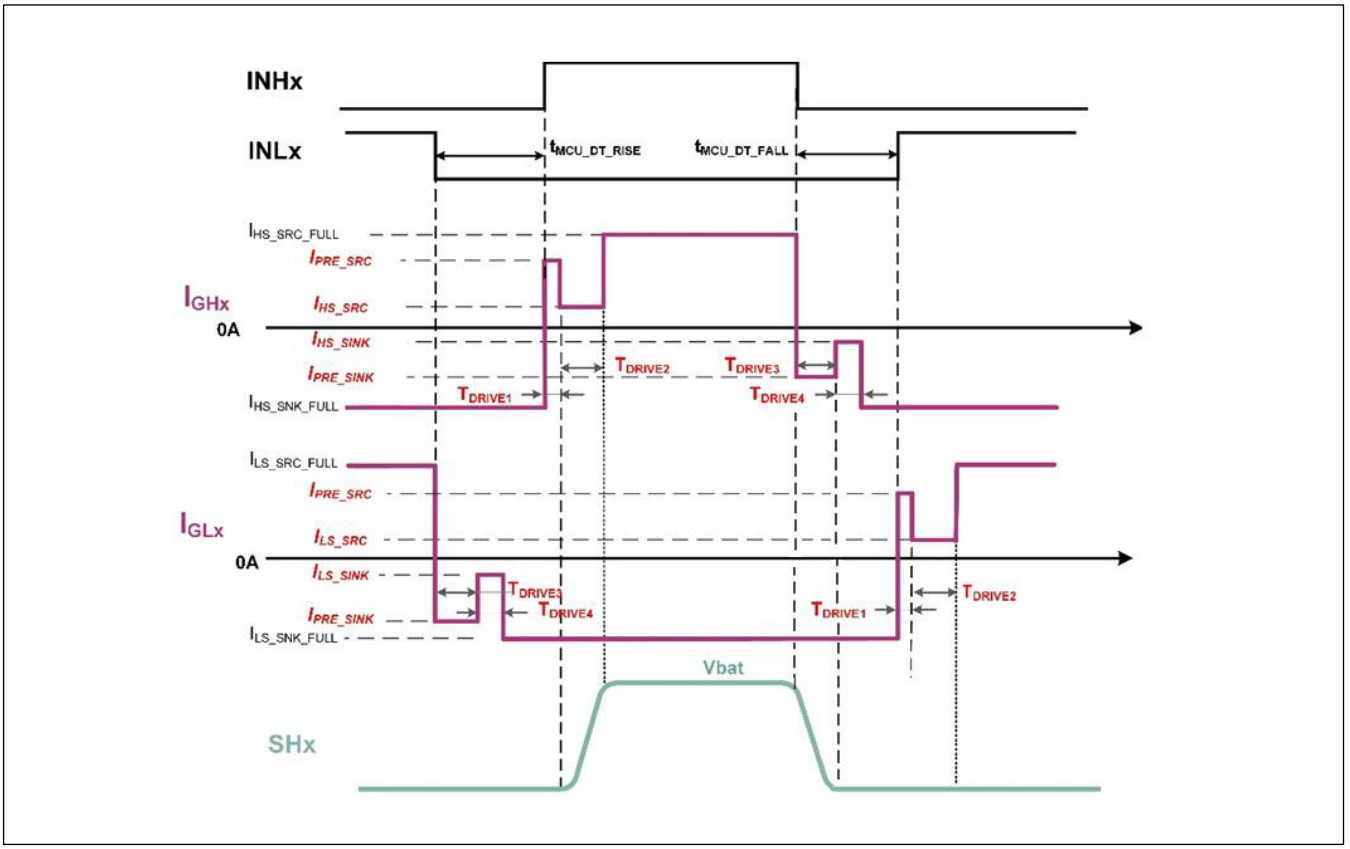

図 25　6EDL7141 ハーフブリッジのスルーレート制御

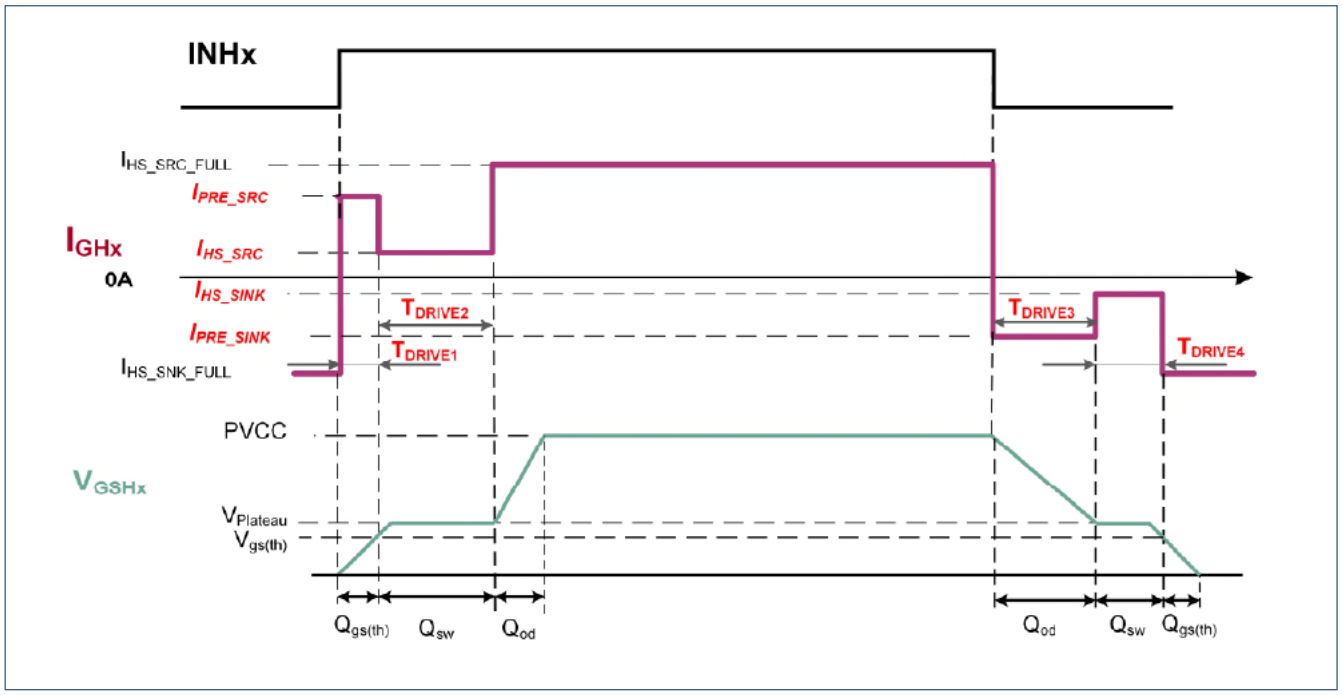

図 26　6EDL7141 ゲート駆動プロファイル

図 26は、典型的なハードスイッチ遷移におけるインバーター相の 1 つであるハイサイド MOSFET の VGS 充放電遷移を詳細に示したものです。MOSFETのスイッチオンとスイッチオフの異なる充電と放電のフェーズが上に示されています。高い$T_{DRIVE(X)}$分解能と各区間の電流を設定できる6EDL7141ゲートドライバーによる柔軟なタイミング構造により、設計者は外部のゲート駆動部品を必要とせずにスイッチオンとスイッチオフの動作を構成し最適化することができます。
ハードスイッチング時には、VDSの遷移に伴い電荷Q_{SW}がゲート端子から注入または抽出される期間TDRIVE2、T_{DRIVE4}においてゲート駆動電流を制御することにより、スルーレートdV_{DS}/dtを調整することが可能になります。$Q_{GS\,(TH)}$、Q_{OD}の高速充放電には高電流を使用することができます。なぜなら、この期間ではdI_D/dt、dV_{DS}/dtともに影響を受けないためです。
プリチャージ電流は17種類の値から選択することができます。16 種類の電流値が IPRE_SRC/SNK で定義され、さらにゲートドライバーの最大電流容量である 1.5A がオプションで追加されます。比較的高いゲート電荷を持つ大型のMOSFETを使用する場合、ターンオン時の$Q_{G(TH)}$やターンオフ時のQODは、ゲートドライバー能力をフルに使用することで恩恵を得ることができる場合があります。プリチャージ時のフルパワーはGUIで選択することができます。$Q_{G(TH)}$が小さくてスルーレート制御用より大きな電流を流すことができない場合、T_{DRIVE1}を0に設定すると、 ゲートドライバーは直ちにT_{DRIVE2}期間の最初に行き、対応するゲート電流を設定することができます。これにより、OptiMOS™やStrongIRFET™など、異なる技術に対応した大型および小型のMOSFETの両方に最適化することができます。同様に、T_{DRIVE2}、T_{DRIVE3}、T_{DRIVE4}はゼロに設定することができ、必要に応じてこれらの期間をスキップすることができます。

4.2.1.2 ゲート駆動電圧

前述の通り、モーター駆動システムでは、様々なサイズのMOSFETとテクノロジーが利用されています。さらに、MOSFET のゲート 閾値はノーマルレベルまたはロジックレベルがあると考えられ、EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH 評価ボードで使用した BSC007N04LS6 などのロジックレベル デバイスの $V_{GS(TH)}$ はノーマルレベル部品より大幅に低くなっています。その結果、あるゲート-ソース間電圧値においては、ロジックレベルのMOSFETはノーマルレベルのMOSFETよりも低い$R_{DS(on)}$となることになります。ゲート駆動電圧を上げると、下図のように導通時のMOSFETチャネルの$R_{DS(on)}$が下がり、その結果、システムの導通損失が減少します。しかし、駆動電圧を上げると、スイッチングの立ち上がり、立ち下がり時間が長くなり、スイッチング損失が大きくなります。

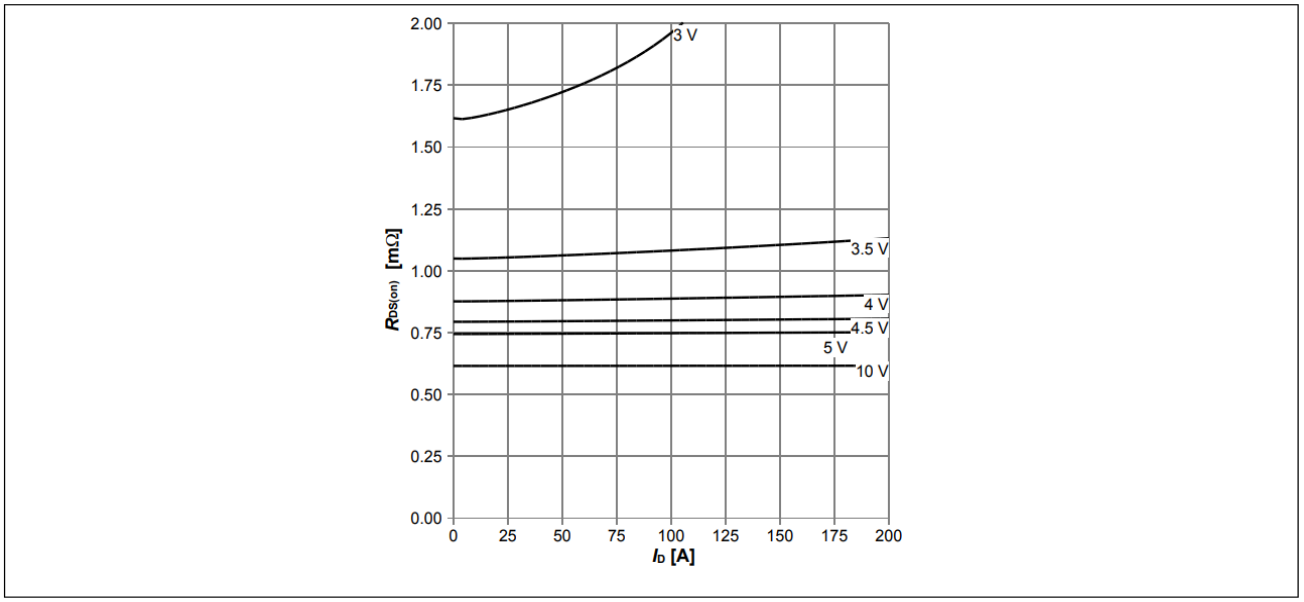

図 27 BSC007N04LS6 $R_{DS(on)}$ vs. V_{GS} 特性

ハードウェアの機能説明

6EDL7141は、システム要件に応じて複数の駆動電圧オプションから選択でき、設計者はSPIレジスターを介してMOSFET駆動電圧 (PVCC電圧) を調整することが可能です。同じ値のPVCCは、ハイサイドとローサイドの両方のチャージポンプに適用され、4つの値が可能です。これはGUIでビットフィールドPVCC_SETPTを設定することで行い、デフォルト値は12Vです。ゲート駆動出力には低電圧ロックアウト (UVLO) 保護機能があります。
インバーターのMOSFETは、ゲートドライバーが起動していないと、ゲート-ソース間電圧がゼロにならないことがあります。場合によっては、このような電圧はMOSFETのゲートオンしきい値を通過するのに十分高く、デバイスのスイッチを部分的にオンにすることが可能となります。このような場合、インバーターのハイサイドとローサイドのMOSFETが同時にオンすると、大電流によりデバイスが破壊される可能性があります。これを防ぐために、各MOSFETのゲートとソースの間に弱いプルダウン抵抗を追加するのが一般的です。6EDL7141は、以下の機能をゲートドライバー出力に内蔵することで、これらの抵抗の必要性を排除しています。

- ウィーク プルダウン: 各ゲートドライバー出力のゲートとソースの間にウィーク プルダウン (RGS_PD_WEAK) が常に接続され ています。これにより、EN_RV が OFF、またはデバイスが完全に OFF (CE off) であることから、ゲートドライバーが OFF 状態の間、弱いプルダウンが保証されます。この機構は、上述したものと同様です。
- ストロングプルダウン: ゲートドライバー オフ時に、何らかの原因で外部ゲート-ソース間電圧が上昇した場合、ストロング プルダウン (RGD_PD_STRONG) が動作し、部分的なターンオンを防止することができます。

4.2.1.3 EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH の値を決定

このシステムは、18 VのバッテリーでBSC007N04LS6 MOSFETが20kHzでスイッチングし、デッドタイムが500nsの設定で設計されています。図 27から、データシートで指定された最低の$R_{DS(on)}$を生成するには、10 Vのゲートドライブ VDRで十分であることがわかります。この例では、過剰なスイッチング損失を発生させずにEMIを最小化するために、スイッチオンとスイッチオフの両方で150 V/µsのスルーレートを設計しています。シュートスルーを防ぐために十分なデッドタイムを設定すれば、これ以外の値でも設計可能です。
次のグラフは、BSC007N04LS6のスイッチオン時の充電フェーズ (スイッチオフ時は逆) の概要です。

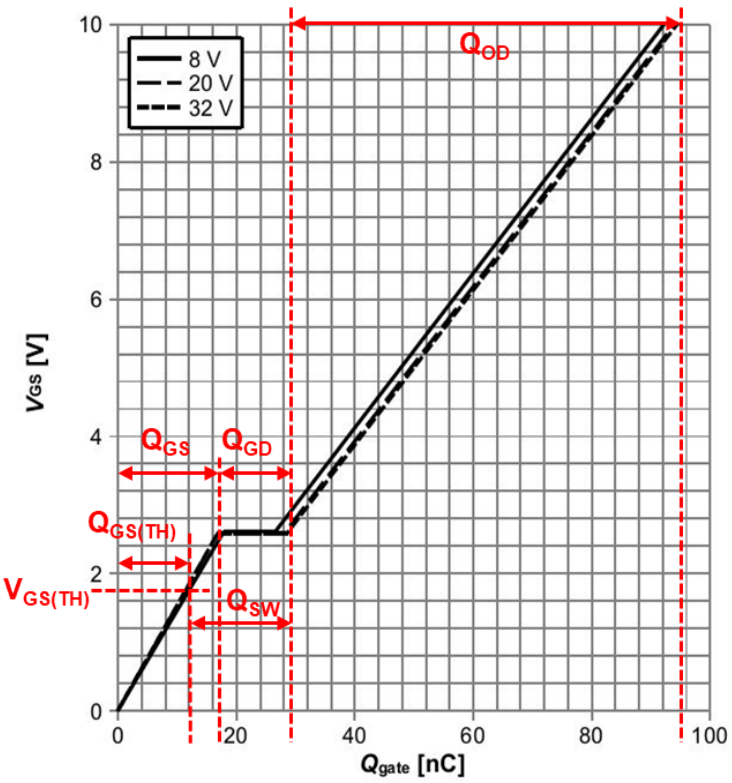

図 28 BSC007N04LS6のゲート電荷の グラフ

アバランシェを防ぐために、モーターがストールしたワーストケースにおいて、スイッチオフ時に発生するVDS過渡電圧をMOSFETのBV_{DSS}定格以下のピークに抑えることが重要です。この過渡ピーク値は、スイッチオフ速度を制限することにより制御されます。スイッチオフの過渡ピーク値は次のように決定されます。

$$V_{DS(PK)} = L_P \cdot \frac{di_D}{dt} \quad [1]$$

ここで、LP はドレイン電流を流す回路のインダクタンスを表し、PCB トレースで構成されます。dI_D/d_tはT_{DRIVE4}中の選択されたゲート電流によって決定されます。

4.2.1.3.1 ゲートスイッチオン設定手順

1. ゲート駆動電圧の設定値を決定
   図 27から、BSC007N04LS6はゲート駆動電圧10Vで完全に最低$R_{DS(on)}$に達していることが分かります。したがって、PVCCは10 Vに設定されます。
2. T_{DRIVE1}の利用可能な最小値である50 nsに基づき選択したIPRE_SRC値からT_{DRIVE1}を決定します。グラフまたはMOSFETのデータシートから$Q_{GS(TH)}$を取得します。BSC007N04LS6の場合、電池電圧18 Vに近いV_{DS} = 20Vの条件を考慮すると、$Q_{GS(TH)}$ = 10.3 nCとなります。

$$I_{PRE_SRC} = \frac{Q_{GS(TH)}}{t_{DRIVE1}} \quad [2]$$

$$I_{PRE_SRC} = \frac{10.3\ nC}{50\ ns} = 206\ mA$$

   T_{DRIVE1}の間にゲートがほぼ$V_{GS(TH)}$まで充電されるように、この値は200mAに切り捨てられています。許容誤差を考慮すると、この値をさらに175mAまで減らした方が安全だと考えます。

3. 希望するスルーレート (この場合は150 V/µs) に基づいて，TDRIVE2およびIHS_SRCまたはILS_SRCを決定します。グラフまたはMOSFETのデータシートから、Q_{SW}を求めます。BSC007N04LS6の場合、Q_{SW} = 18 nCです。
   (ここで、$Q_{SW} = Q_{GS2} + Q_{GD}$、この場合$Q_{GD}$ = 11.2 nC、$Q_{GS2} = Q_{GS} - Q_{G(TH)}$ = 17 nC - 10.3 nC = 6.7 nC)
   T_{DRIVE2}は次のように計算できます。

$$\frac{dV_{DS}}{dt} = \frac{V_{BAT}}{t_{DRIVE2}} \quad [3]$$

$$t_{DRIVE2} = {V_{BAT}}\Big/{\left(\frac{dV_{DS}}{dt}\right)} = {18}/{150} = 120\ ns$$

   その結果をもとに、電荷プラトー領域の終点に到達することでVGSスイッチング動作を完了するのに必要なゲート-ソース電流を計算します。

$$t_{DRIVE2} = \frac{Q_{SW}}{I_{HS,LS_SRC}} \quad [4]$$

$$I_{HS,LS_SRC} = \frac{Q_{SW}}{t_{DRIVE2}} = \frac{18\ nC}{120\ ns} = 150\ mA$$

   実際には、スイッチング遷移 (dV_{DS}/dt) の全期間にわたって I_{HS,LS_SRC} でゲートを駆動し続ける必要があるため、t_{DRIVE2} を 140 ns に調整し、遷移の終わりを超えるように少なくとも 10%のマージンを持たせています。
4. 最終段階では、Q_{OD}を充電し、V_{GS}を$V_{PLATEAU}$から10Vにできるだけ早く到達させます。

$$Q_{OD} = Q_G - Q_{SW} - Q_{G(TH)} \quad [5]$$

   BSC007N04LS6用:

$$Q_{OD} = 94\ nC - 18\ nC - 10.3\ nC = 65.7\ nC$$

5. この間、最大1.5 Aのゲート ドライブ ソース電流が印加されます。所要時間は次のように計算できます。

$$t_{OD} = \frac{Q_{OD}}{I_{GD_SRC_PEAK}} \quad [6]$$

$$t_{OD} = \frac{65.7\ nC}{1.5\ A} = 43.8\ ns$$

V_{GS}が全電圧まで充電されると、ゲート ドライバーは1.5 Aのソース電流を維持できなくなりますが、ゲートはプルアップされたままであることに留意してください。

4.2.1.3.2 ゲートスイッチオフ設定手順

1. スイッチオフの最初の部分では、V_{GS}を10Vから$V_{PLATEAU}$にするためにQ_{OD}が放電され、これはゲートシンク電流IPRE_SINKの期間T_{DRIVE3}中に発生します。Q_{OD}はグラフまたはMOSFETのデータシートから取得してください。かなり高速で起きるはずです。

   T_{DRIVE3} の値を 200 ns とすると、IPRE_SINK は次のように計算できます。

   $$I_{PRE_SINK} = \frac{Q_{OD}}{T_{DRIVE3}} \quad [7]$$

   $$I_{PRE_SINK} = \frac{65.7\ nC}{200\ ns} = 328.5\ mA$$

   この値は最も近い値に切り捨てられ、300 mAとなります。

2. T_{DRIVE4}とI_{HS_SINK}またはI_{LS_SINK}は，希望するスルーレートに基づいて決定してください。
   この場合、値は150 V/µsになります。

   $$\frac{dV_{DS}}{dt} = \frac{V_{BAT}}{t_{DRIVE4}} \quad [8]$$

   $$t_{DRIVE4} = {V_{BAT}}\Big/{\left(\frac{dV_{DS}}{dt}\right)} = {18}/{150} = 120\ ns$$

   その結果をもとに、ゲート閾値電圧$V_{GS(TH)}$の終端に到達してV_{GS}スイッチング遷移を完了するのに必要なゲートソース電流を計算します。

   $$t_{DRIVE4} = \frac{Q_{SW}}{I_{HS,LS_SINK}} \quad [9]$$

   $$I_{HS,LS_SINK} = \frac{Q_{SW}}{t_{DRIVE4}} = \frac{18\ nC}{120\ ns} = 150\ mA$$

   スイッチオン時と同様に、スイッチング遷移の期間 (ここではT_{DRIVE4}) を延長し、遷移が完了するまで $I_{HS,\ LS_SINK}$ が印加されるようにします。そのため、t_{DRIVE4}は再び140nsに調整されます。
   この例では、スイッチオフとスイッチオンのスルーレートが同じなので、$T_{DRIVE4} = T_{DRIVE2}$，$I_{HS,LS_SINK} = I_{HS,LS_SRC}$ となります。ただし、スイッチオンとスイッチオフで異なるスルーレートを選択したい場合は、$T_{DRIVE4} \neq T_{DRIVE2}$、 $I_{HS,\ LS_SINK} \neq I_{HS,\ LS_SRC}$ となります。

3. 最終段階では$Q_{G(TH)}$を放電し、V_{GS}を$V_{GS(TH)}$からできるだけ早くゼロにします

   BSC007N04LS6では$Q_{G(TH)}$=10.3 nCなので、この間に流れる最大ゲート駆動シンク電流1.5 Aから、残りのスイッチオフ時間を計算します。

所要時間は、次のように計算できます。

$$t_{TH} = \frac{Q_{G(TH)}}{I_{GD_SINK_PEAK}} \quad [10]$$

$$t_{TH} = \frac{10.3\ nC}{1.5\ A} = 6.87\ ns$$

V_{GS}がゼロになるとシンク電流はゼロになりますが、MOSFETがオフの間は強力なプルダウンが維持されます。

4.2.1.3.3 デッドタイムの設定

1. 総スイッチオフ時間は以下のように計算します。

$$T_{DRIVE(OFF)} = T_{DRIVE3} + T_{DRIVE4} + T_{TH} + t_{rr} \quad [11]$$

$$T_{DRIVE(OFF)} = 200\ ns + 140\ ns + 6.87ns\ +\ 36ns\ = 372.87\ ns$$

また、MOSFETのボディダイオードの回復時間t_{rr}も加える必要があります。部品のばらつきや温度変化によるMOSFETのシュートスルーやアバランシェの可能性を避けるため、計算値に20%以上加えることを推奨します。

デッドタイムT_{DT}は$T_{DRIVE(OFF)}$+20%より大きくなるように設定してください。

EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH評価ボードでは、システムが6PWMモードで動作するため，デッドタイムは6EDL7141ではなくマイコン側で設定されます．

$$T_{DT} \geq T_{DRIVE(ON)} \times 1.2 \quad [12]$$

$$T_{DT} \geq 372.87\ ns \times 1.2\ = 446\ ns$$

最も近い値は440nsです。立ち上がり、立ち下がりのデッドタイム(TDT+およびTDT-) は共にこの値かそれ以上の値に設定されます。

また、EMIやスイッチオフ過渡現象を低減するために、各MOSFETにドレイン-ソース間スナバネットワークを接続した場合(EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH)、スナバコンデンサーの充電ができるようデッドタイムをさらに長くしないとローサイドでハードスイッチングする可能性があるので注意が必要です。また、スイッチオフ時のゲート駆動によりターンオフが遅くなると、スイッチング遷移 (dV_{DS}/dt) も遅くなり、これもデッドタイムを長くしないとローサイドでハードスイッチングする可能性があります。この設計では、ハイサイドとローサイドの両方がハードにスイッチングしても、スイッチング損失は許容できるほど低くなっています。

表 3 計算されたゲートドライブパラメーター一覧

パラメーター	記述	値
I_{HS_SRC}	ハイサイドMOSFETをスイッチングするためのソース電流値	150 mA
I_{HS_SINK}	ハイサイドMOSFETのスイッチオフ時のシンク電流値	150 mA
I_{LS_SRC}	ローサイドMOSFETをスイッチングするためのソース電流値	150 mA
I_{LS_SINK}	ローサイドMOSFETのスイッチオフ時のシンク電流値	150 mA
I_{PRE_SRC}	ハイサイド、ローサイド両方に対するスイッチング時のプリチャージ電流値	175 mA
I_{PRE_SNK}	ハイサイド、ローサイド両方に対するスイッチオフ時のプリチャージ電流値	300 mA

T_{DRIVE1}	I_{PRE_SRC} が適用される時間の値 ハイとローの構成を設定共有‘	50 ns
T_{DRIVE2}	I_{HS_SRC}、 I_{LS_SRC} が適用される時間の値 ハイサイドドライバとローサイド ドライバーで設定を共有	140 ns
T_{DRIVE3}	I_{PRE_SNK} が適用される時間の値 ハイサイドドライバとローサイド ドライバーで設定を共有	200 ns
T_{DRIVE4}	I_{HS_SINK}、 I_{LS_SINK}とが適用される時間の値 ハイサイドドライバとローサイド ドライバーで設定を共有	140 ns

4.2.1.3.4 ベンチでのゲート駆動の調整手順

1. 各MOSFET Q1～Q6のドレイン ソース間にRCスナバを設置すること
2. 立ち上がり、立ち下がりのデッドタイムのデフォルト値120nsは使用しないでください！
   シュートスルーが発生しないように、計算値よりも長いデッドタイムを最初に設定してください。 TDRIVE とゲート駆動電流の設定が決まったら、デッドタイムを適切な値まで減らしてください。
3. GUIでBLDCシングルシャント設計のプロジェクトを作成し、以下の値を入力します。T_{DRIVE1}、 T_{DRIVE2}、 T_{DRIVE3}、 T_{DRIVE4}、 I_{PRE_SRC}、 I_{PRE_SINK}、 I_{HS,LS_SINK}、 I_{HS,LS_SRC}、 上記手順で算出された値を入力します。
4. プロジェクトを保存
5. write deviceコマンドを使用して、プロジェクトの値を6EDL7141を設定します。
6. 公称バッテリー電圧で基板を動作させ、ハイサイド用差動プローブでハイサイドとローサイドのVGSとVDS波形を監視します。
7. 最大負荷[2]まで上昇させ、V_{DS}過渡ピーク値を確認し、アバランシェが発生していないこと、ピーク電圧とMOSFETのB_{VDSS}定格の間に十分なヘッドクリアランスがあることを確認します。
8. スルーレートが目標値通りかどうか判断する。そうでない場合は、スイッチング過渡応答が正しくなるように、必要に応じてGUIでゲート駆動のソース電流とシンク電流を調整します。
9. EMI測定を行う場合、EMIを低減するためにスルーレートを小さくすることがあります。ただし、その場合、スイッチング損失が増加することに注意してください。
10. デッドタイムの値を希望する値に設定する。スルーレートが変更された場合、デッドタイムを再計算し、遅いスルーレートに対応するように調整することを確認します。
11. 値を変更するたびにプロジェクトを保存します。
12. 最終的な値が決まったら、「burn OTP」機能を使って、この値を6EDL7141に恒久的に設定します。

[1]負荷がBLDCモーターの場合は、トルクと回転数を上げてシステムに十分な負荷をかけてください

4.2.2 バックレギュレーターとリニアレギュレーターの構成

VDDB出力は、バックコンバーター、チャージポンプ、リニアレギュレーターの電流制限を超えない限り、外部部品への供給が可能です。ゲート駆動電圧の選択により、6.5 V、7 V、8 Vのいずれかに設定することが可能です。また、VDDB 出力が過負荷になった場合にデバイスの損傷を防ぐために、バックコンバーターとリニアレギュレーターの両方にインテリジェントな過電流保護 (OCP) が実装されています。さらに、デバイスが正しい温度制限内で動作するように、過温度保護機能 (OTS、OTW) が統合されています。
スイッチング周波数は、500 kHz (初期値) または1MHzの2種類をGUIで選択できます。降圧用インダクターL1の値は、500 kHzの場合は22 µH、1 MHzの場合は10 µHです。降圧出力コンデンサー C40 と C41 の値は 22 µF で、高周波ノイズを低減するために 0.22 µF のセラミックコン デンサー C320 が追加されています。同期型降圧コンバーターとリニア電圧レギュレーターの両回路を次の図に示します。

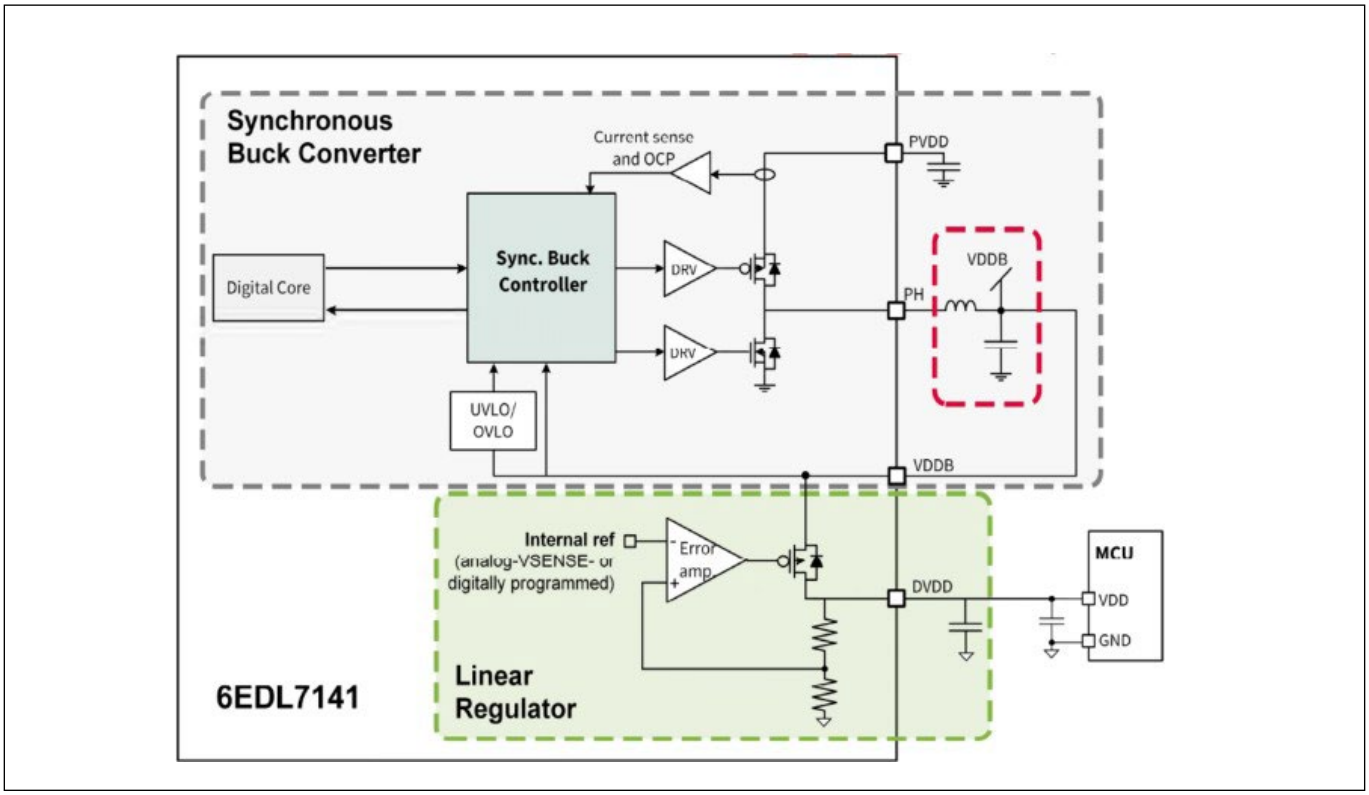

図 29　統合された同期整流式バックコンバーターとリニアレギュレーターの詳細

バックコンバーターが正しく動作するように、以下の保護機能が実装されています。

- 出力　　UVLO
- 出力　　過電圧ロックアウト (OVLO)
- OCP、サイクル単位

電流がOCPレベルを超えた場合、降圧コンバータコントローラーは次のPWM期間が始まるまでハイサイドのゲート駆動パルスを終了させます。ローサイドはデッドタイム時間挿入後、適切なタイミングで動作します。

OCPイベントが発生すると、ピーク電流に達するまで連続したピリオドごとにカウンターがインクリメントされます。16回のスイッチングサイクルの後、降圧型OCPフォルトがトリガーされ、nFAULTピンがローにセットされてMCUに信号を送ります。MCUが電力を維持できるように、降圧コンバーターは電流制限状態で動作を継続します。3回連続してPWM周期でOCPがトリガーされないと、カウンターはリセットされます。

内蔵のリニア レギュレーター出力DVDDは、外部抵抗R44によって3.3 Vまたは5 Vに設定することができ、この評価ボードではDVDDを5 Vに設定するために10 kΩに設定されています。また、リニア レギュレーターを使用して電流センスアンプにオフセットを与えることで、負電流の測定も可能です。

DVDDのOCPは50 mA、 150 mA、 300 mA、 450 mAの4段階で設定可能で、デフォルトは450 mAです。OCPレベルに達した場合、nFAULTピンからフォルトが報告されます。DVDD OCPは2つの異なるステージで動作します。

1. 選択されたOCPレベルの66%の値でのプリワーニングモード
   nFAULTピンは、OCP警告が発生したことをコントローラーに知らせるためにプルダウンされています。電流レベルが100%に達する前に減少した場合、動作は正常に継続し、nFAULTピンは解放されます。事前警告により、マイコンがOCPの可能性がある事象にどのように対応するかを決定するために、いくらか余裕を持たせることができます。
2. 選択されたOCPレベルの100%で電流制限モード
   電流が設定されたOCPレベルを超えて増加した場合、DVDDレギュレーターは出力電流を制限します。これにより、DVDDの電圧が低下し、最終的にUVLO閾値を越えると、DVDD UVLOフォルトとなります。これは、DVDDを短絡状態から保護するものです。
   絶対最大定格の条件に長時間さらされると、デバイスの信頼性に影響を与える可能性があります。本デバイスは、データシート[1]に記載された推奨動作条件でのみ動作させる必要があります。

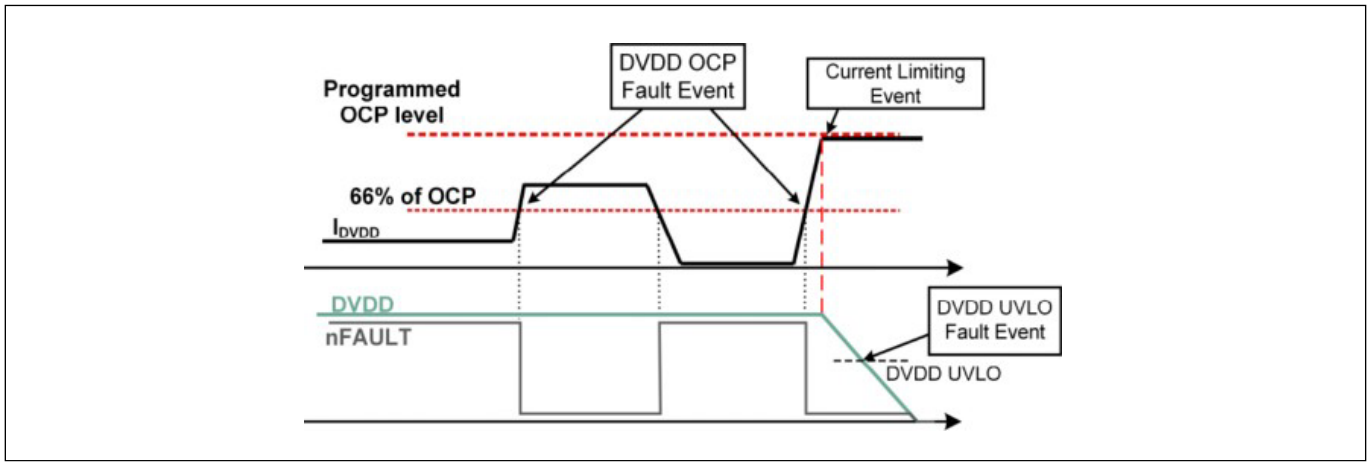

図 30　DVDD OCP 動作 (プリワーニングモードと電流制限モードを含む)

4.2.3 チャージポンプの構成

ハイサイドとローサイドのゲートドライバチャージポンプは、予め決められたスイッチング周波数で動作するスイッチドキャパシター回路を基にしています。781.3 kHz、390.6 kHz、195.3 kHz、1.56 MHzの4つの周波数から選択することができ、781.3 kHzを初期設定とし、EMCの最適化に柔軟に対応できるようにしました。また、チャージポンプのEMI影響を低減するのに有効な機能として、スペクトラム拡散機能があり、これもGUIで有効 無効の切り替えが可能です。この機能はデフォルトで有効になっており、チャージポンプのクロック信号に周波数変化を与えることで、エミッションをより広い周波数範囲に分散させ、ピークを低減します。

チャージポンプ フライング コンデンサーC33とC39の選択は0.22 µFに、タンク コンデンサーC30とC32は2.2 µFに設定されています。6EDL7141 では、EN_DRV 端子が起動する前に、チャージポンプ出力コンデンサー (C30 と C32) を降圧コンバーター出力電圧 (VDDB) 直下の電圧までプリチャージすることができます。このようにすることで、チャージポンプの起動時間、ひいてはシステムの立ち上がり時間を短縮することができます。この場合、マイクロコントローラーによってEN_DRVが起動されてゲートドライバー段が有効になると、チャージポンプは既存のプリチャージ電圧から選択されたターゲット値まで電圧を上昇させるだけでよいのです。プリチャージはデフォルトで無効になっており、GUIで有効にすることができます。

チャージポンプの起動時間は、ゲート駆動電源電圧がターゲットプログラム電圧に到達するまでに必要な時間として定義され、いくつかの要因に依存します。

- ターゲット電圧: 高いほど、ゲートドライバーの起動時間が長くなります
- チャージ ポンプのクロック周波数: クロック周波数が高いほど、起動時間が早くなります。
- チャージ ポンプタンクのコンデンサーの値: 値を小さくすると立ち上がり時間が早くなりますが、リップルが大きくなります。
- チャージ　ポンプのフライング コンデンサー: コンデンサーが小さいと起動時間が遅くなります。

4.3 電流センスアンプの構成

このデバイスは3つの電流センスアンプを内蔵しており、シャント抵抗を介してインバーターの電流測定に使用することができます。以下に示すように、シングル、ダブル、トリプルシャント測定に対応しています。電流センスアンプはそれぞれ個別に有効にすることができます。ゲインおよびオフセットは内部で生成され、プログラマブルです。

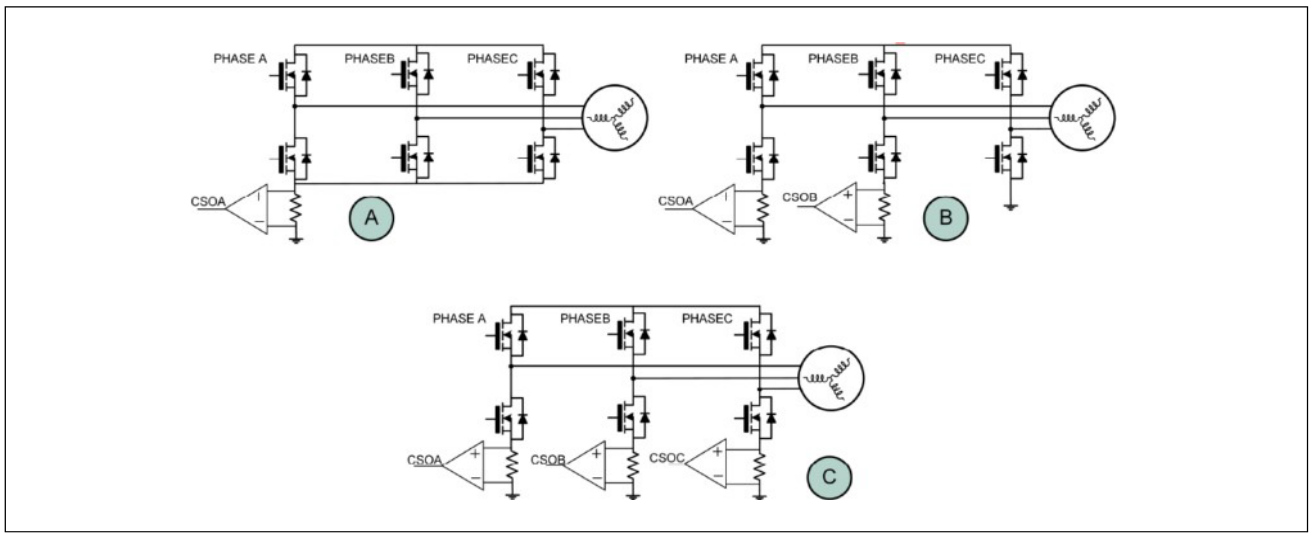

図 31　シングル (A)、デュアル (B)、トリプル (C) シャント電流センシング構造

電流センスアンプ部には、以下のサブブロックがあり、本節で詳しく説明します。

- 電流検出用アンプ: 外部シャント抵抗または内部SHx　端子に接続し、$R_{DS(on)}$センシングを行う。シャント電圧または$V_{DS(on)}$電圧をマイコンADC入力に適したレベルまで増幅するモジュールです。ゲート駆動に同期したリーディング エッジ ブランキングを搭載し、期間中はアクティブにしてノイズを除去します。
- 出力バッファ: センスアンプ出力に可変のオフセット電圧を付加することが可能です。オフセット量は、内部生成レベルのプログラム、またはVREF入力端子に外部電圧を印加することで、4種類の値から選択できます。この実装により、負のシャント電流を測定することも可能です。
- 正の過電流コンパレーター: シャント電圧が正の場合にモーター巻線の過電流状態を検出するために使用します。このコンパレーターにより、ゲートドライブパルスが終了し、モーター電流が制限されます。
- 負の過電流コンパレーター: モーター巻線に流れる負のシャント電流の過電流検出に使用します。
- OCP DAC: 過電流コンパレーターの閾値をプログラムするために使用します。1つはプラスレベル、もう1つはマイナスレベルを設定し、異なるOCPコンパレーター間で共有されます。

電流センスアンプのアーキテクチャーには、"オートゼロ "機能が搭載されています。これは、6EDL7141の起動時および動作時に行われ、デバイスの寿命が尽きるまで測定の精度を維持します。GHxの立ち上がりエッジが所定時間 (tAUTO_ZERO_CYCLE) 発生しない場合、つまり、6段階の整流でローサイドが長時間完全にオンになった場合、内部ウォッチドッグ タイマーが自動ゼロ補正をトリガーするのです。オートゼロはスタンバイ状態でも継続的に行われます。オートゼロ機能はGUIで無効にすることができます。さらに、6EDL7141には電流センス アンプのユーザー キャリブレーション モードがあり、シャント電流がゼロであることが分かっている時、つまりすべてのゲート駆動がローの時に、オフセットを測定して補正するのに使用することができます。

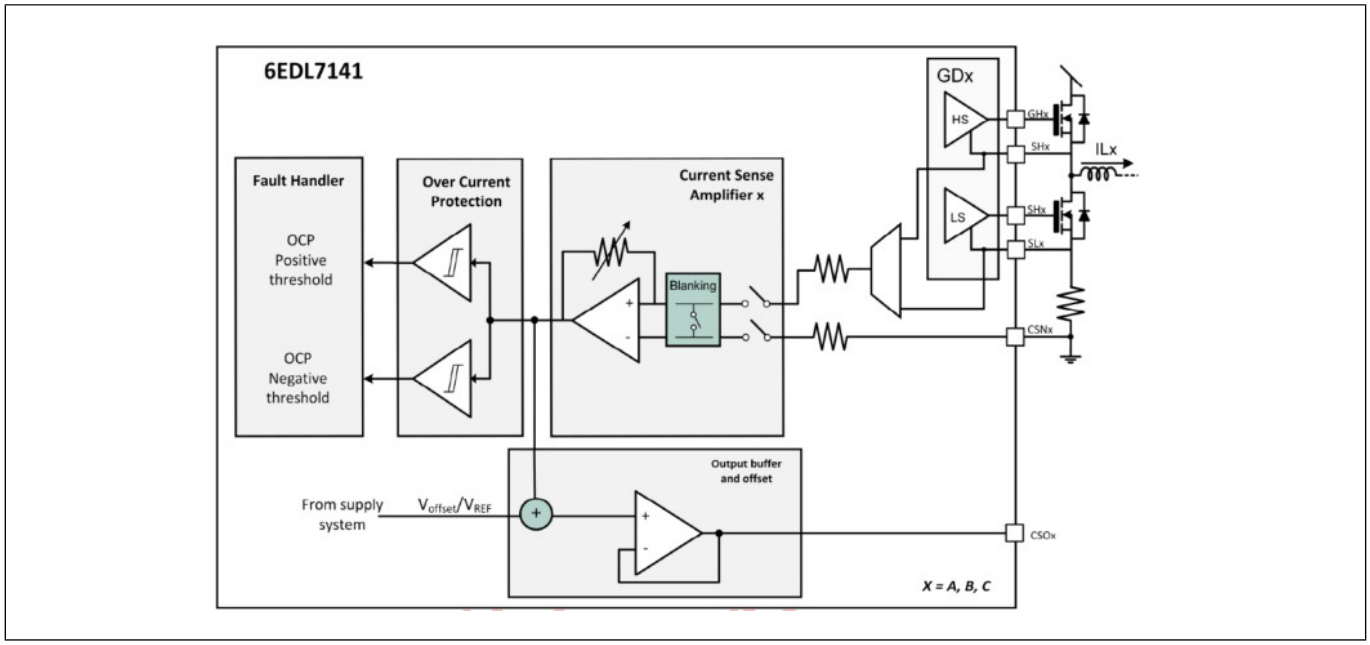

図 32 電流検出アンプの簡略化したブロック図

6EDL7141の電流センスアンプは、シャント抵抗を使用しないように$R_{DS(on)}$センスに設定できるが、500 µΩのシャント抵抗RS1を1つ使用するEVAL_6EDL7141_TRAP_1SHボードでは、この機能は使用されていません。この実装では、電流センスアンプが1つだけ必要です。

電流センス アンプの電圧利得はデフォルトで4ですが、GUIで以下の値に変更することが可能です。8、 12、 14、 20、 24、 32、 64。また、CS_GAIN端子からグランドに外部抵抗を接続してゲインを選択することも可能です。外部抵抗による電流センスアンプのアナログプログラミングを有効にするには、ビットフィールドCS_GAIN_ANAが適切に設定されていることを確認する必要があります。RGAINの値は、6EDL7141のスタートアップシーケンスで読み取られます。データシート[1]の表15に、アナログモードとデジタルモードの両方でゲインを選択するための抵抗値およびレジスター設定が記載されています。

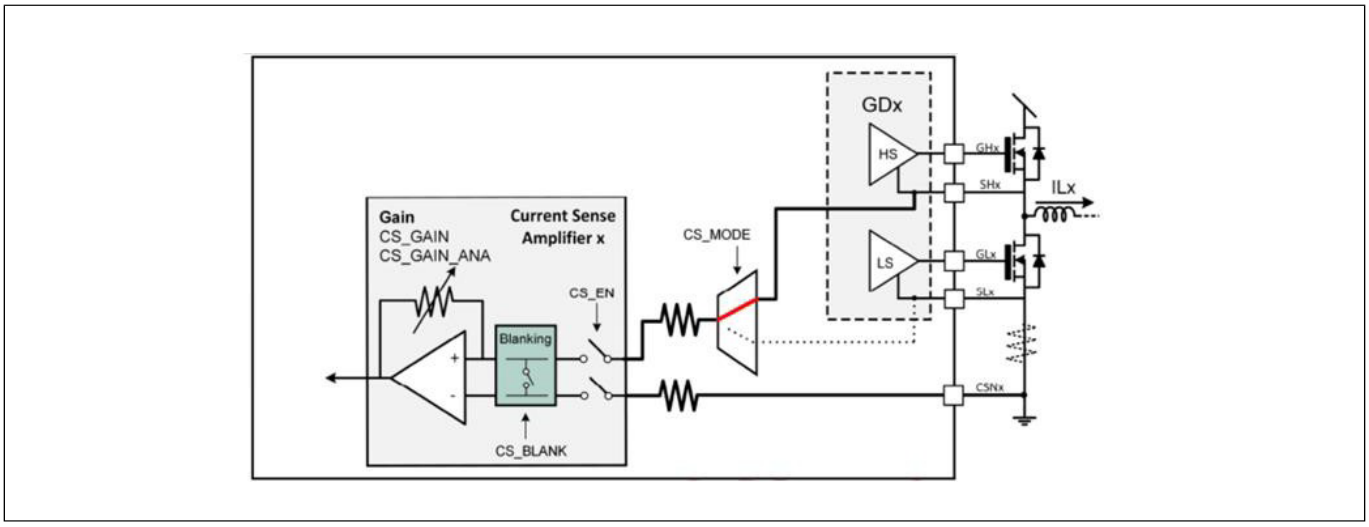

図 33　ローサイド$R_{DS(on)}$電流センシングのシステム構成図 (ここでは使用しない)

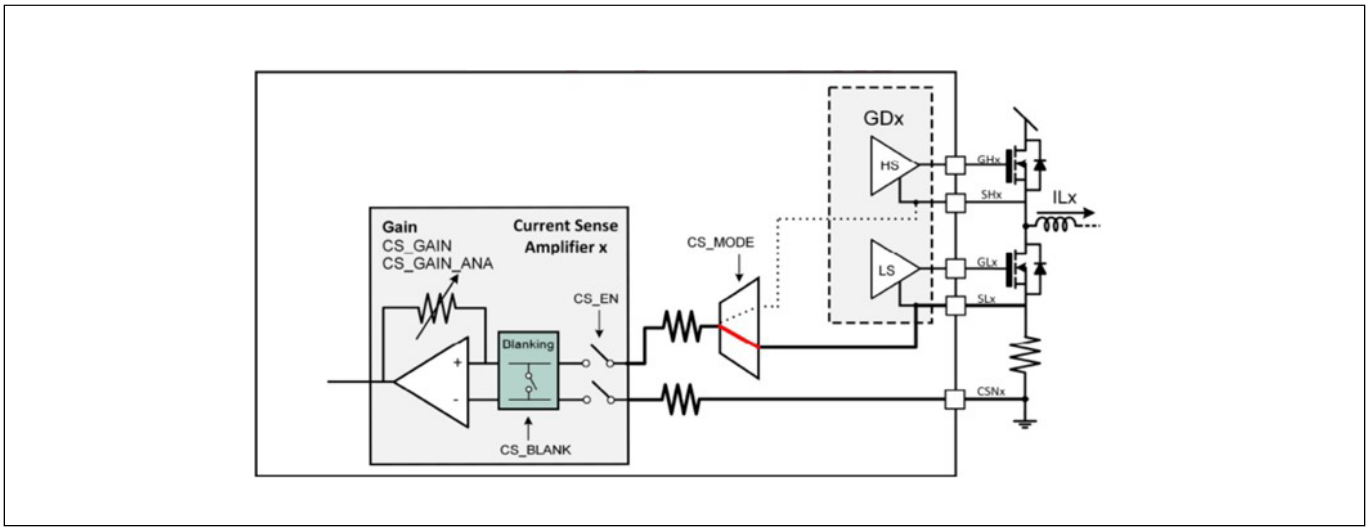

図 34　外部シャント電流検出方式のシステム構成図

本評価ボードのようなモーター駆動用インバーターでは、シャント抵抗を介して電流をセンシングするものが多い。この場合、ローサイドのMOSFETがオンになったときだけ、シャント間の電圧を増幅する必要がある。その他のケースでは、信号を継続的に監視することが有効な場合があります。6EDL7141は、出力がアンプに接続される場合に関して、電流センス アンプの4種類の動作モードをサポートしており、GUIから選択することができます。

この4つのモードは、

- 常時OFF: 電流センスアンプ出力無効。これは、ビットフィールドCS_ENにより、レジスターCSAMP_CFGでアンプをディセーブルにすることにより実現されます。.
- GL ON (デフォルト モード): このモードでは、対応するGLx信号がアクティブのときのみ、CSOxピンがアンプに接続されます。シングルシャントモードでは、CSOxは2つまたは3つのGLx信号のすべてのORに応じて接続されます。2つまたは3つのアンプが有効な場合、CSOxを有効にするための信号は、対応するGLx信号から送られます。このモードは、内部回路への過電圧による損傷を避けるため、$R_{DS(on)}$検出を選択した場合に必須となります。
- GH OFF: GL ONと同様、GL ONの期間だけ出力が露出され、立ち上がりと立ち下がりの両方のデッドタイムまで検出期間が延長されるモードです。
- Always ON: アクティブになったアンプのCSOx信号を、PWM信号とは別にアンプに連続的に接続するモードです。

電流センスアンプにプログラマブル リンディングエッジ ブランキング機能を設定することができます。位相ノード電圧SHxおよびSLxピン (CSNy) の両方がスイッチング動作によるリンギングの対象となるため、ブランキング モジュールは設定可能な時間 (CS_BLANK)、入力を切断します。デフォルトのブランキング時間はゼロで、50 nsから8 µsの値をGUIで選択できます。6EDL7141 内部リニア電圧レギュレーター (DVDD) は、電流センス アンプ用のオフセット生成に使用できます。デフォルト値は1/2DVDDで、値は次のとおりです。5/12、 1/3、 1/4DVDD の値も使用可能です。

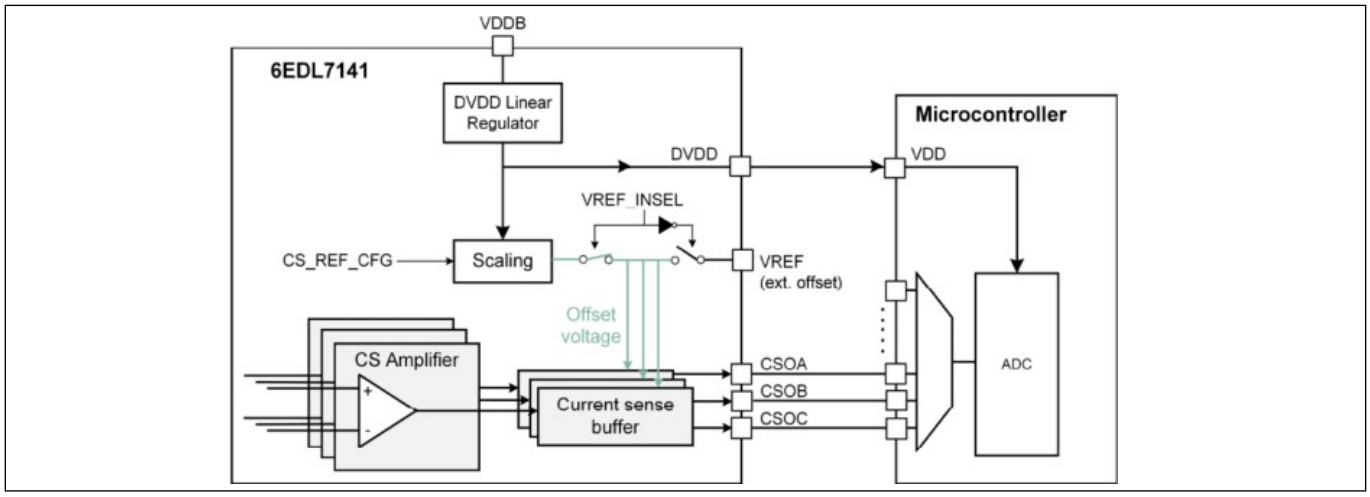

図 35　電流検出アンプオフセット生成ブロック図

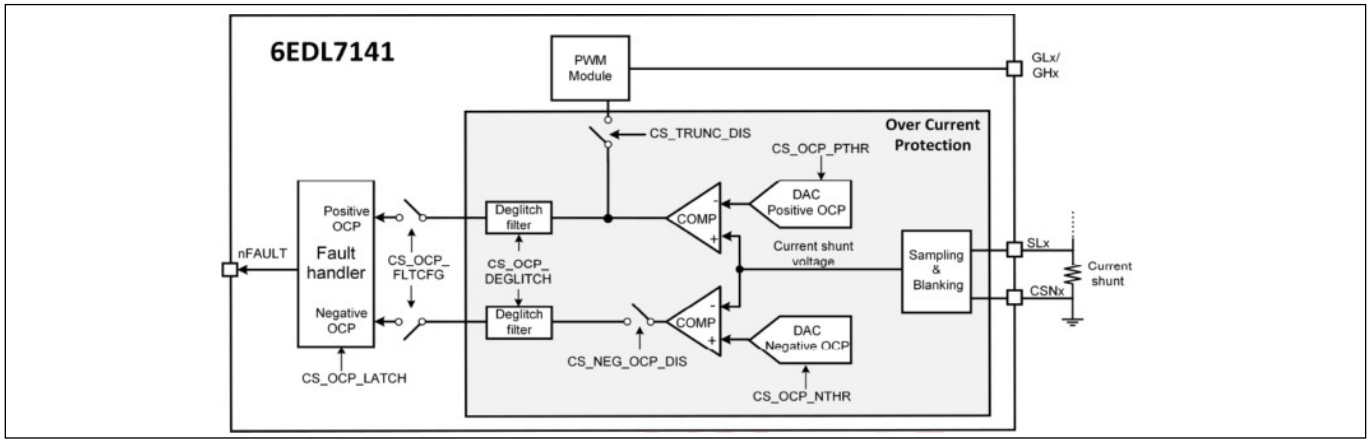

図 36　電流検出アンプの構成

6EDL7141 が OCP イベントに対してどのように反応するかは、GUI からプログラム可能です。以下のシナリオは、さまざまなアプリケーションで有用です。

- OCPイベント発生直後にPWMトランケーションを行い、OCPイベント発生後にnFAULT端子で 報告 - トランケーションを有効にした場合、デグリッチ機能は無効になります。
- PWM トランケーションを維持したまま、レポーティングを無効にする。
- OCPイベント発生時に設定可能なブレーキ動作をトリガーします。トランケーションが必要ない場合は、利用可能なブレーキモードの1つを使用してブレーキイベントを構成することができる。
- OCP保護機能、nFAULT報告、PWMトランケーションのいずれも無効とします。この場合、OCPは無視されます。

また、OCPフォルトをラッチするかどうかをGUIで選択することも可能です。ラッチ構成では、SPIコマンドでフォルトがクリアされるまで、または電源再投入後まで、nFAULTピンはLowに保持されます。OCPフォルトがノンラッチに設定されている場合、フォルトが検出されている間は、nFAULTピンはローのままですが、OCP状態がなくなると再びプルアッ プします。設定により、nFAULTフォルト信号の起動に必要な 連続イベント (PWMサイクル) の目標数を設定することができ ます。

正のOCP事象が発生した場合、ハイサイドPWMは切り捨てられます。その結果、ハイサイドMOSFETは全てスイッチオフとなり、そのためモーター巻線に流れる電流はローサイドMOSFETのボディダイオードを通して再循環することになります。

4.3 XMC1404-VQFN64-200kBマイクロコントローラー

マイクロコントローラーは、以下の入出力を通じて、システムと相互作用します。

表 4 マイクロコントローラーの入出力数

Port	Configuration	Description
P0.7	Digital input	Enable
P2.7	Digital input	Braking switch
P4.1	Digital input	Hall sensor input – phase A
P4.2	Digital input	Hall sensor input – phase B
P4.3	Digital input	Hall sensor input – phase C
P4.10	Digital input	Motor direction
P2.3	Analog input	Battery voltage sense
P2.10	Analog input	Shunt current sense through amplifier
P2.5	Analog input	Potentiometer voltage sense
P2.2	Analog input	Back EMF sense – phase U
P2.1	Analog input	Back EMF sense – phase V
P2.0	Analog input	Back EMF sense – phase W
P2.4	Analog input	Temperature sensing
P3.2	PWM output	Low-side gate pulse – phase U (INLA)
P3.3	PWM output	High-side gate pulse – phase U (INHA)
P3.0	PWM output	Low-side gate pulse – phase V (INLB)
P3.1	PWM output	High-side gate pulse – phase V (INHB)
P1.1	PWM output	Low-side gate pulse – phase W (INLC)
P1.0	PWM output	High-side gate pulse – phase W (INHC)
P1.3	Digital output	Brake command
P1.2	Digital output	Auto zero command
P0.12	Digital output	Fault indicator
P3.4	Digital output	Fault indicator (nFAULT) (LED1)
P4.7	Digital output	LED indicator (LED5)
P4.8	Digital output	LED indicator (LED4)
P4.4	Debug	PC_RX
P4.5	Debug	PC_TX
P0.14	Debug	SWDIO/TMS
P0.15	Debug	SWDCLK/TCK

4.4 基板の接続と制御

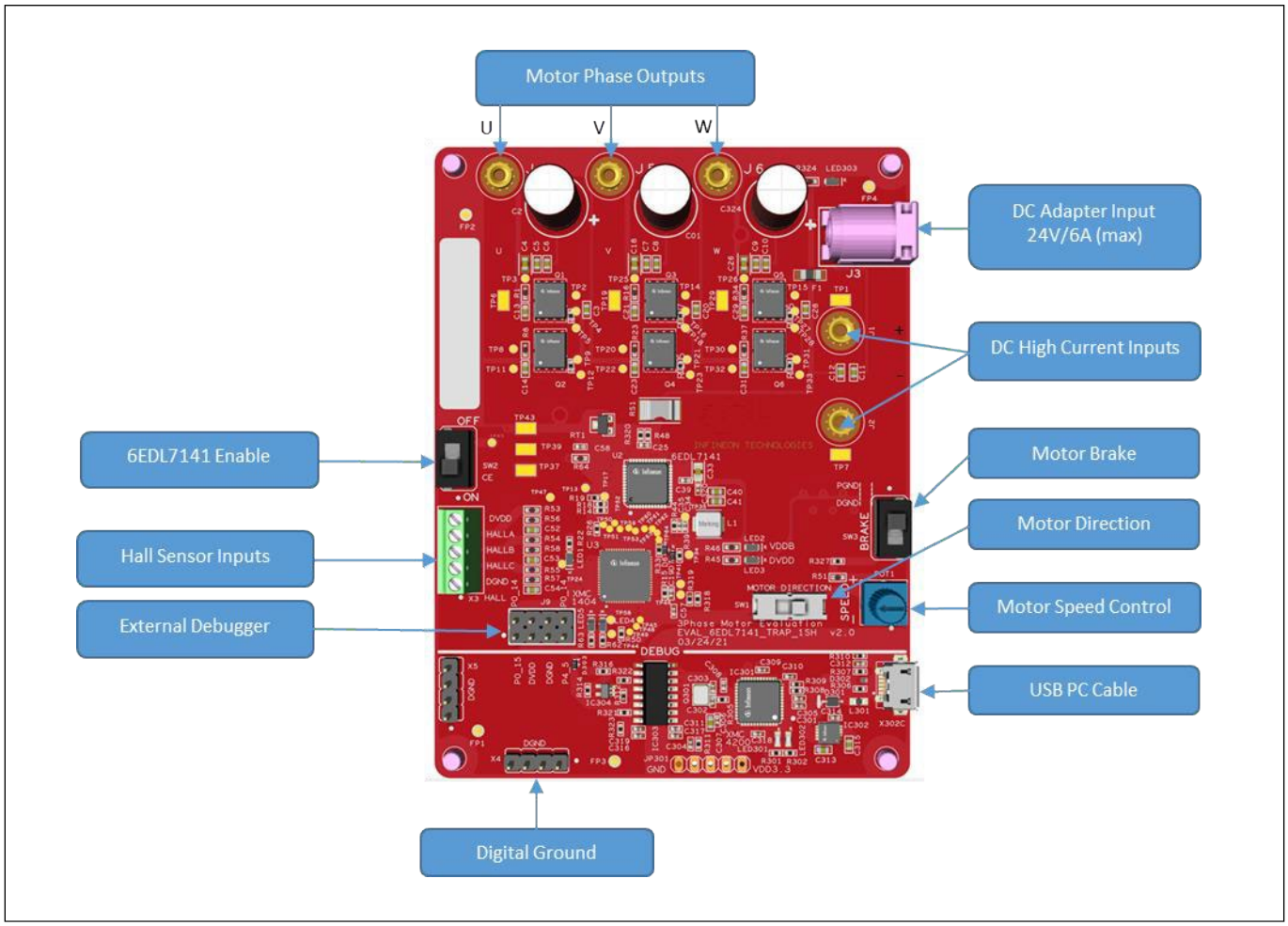

図 37 EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH の外部接続と制御部

4.5 オンボードプログラマ/デバッガー

EVAL_6EDL7141_TRAP_1SHボードにはオンボードデバッガーが搭載されており、上面のコンポーネント凡例にある黄色い線の下に位置しています．このデバッガーは、USB ケーブルで PC に接続し、専用の GUI や DAVE™ などのファームウェア開発ツールで制御、プログラミング、デバッギングが可能です。

4.6 外部プログラマー／デバッガー

何らかの理由で、XMC-リンクなどの外部デバッガーを使用したい場合は、表示されている 4 x 2 ウェイ ヘッダーを使用して接続することができます。

5 制御 ファームウェア

5.1 台形制御 (6段式、矩形波制御とも呼ばれる)

正弦波電圧で駆動する一般的な同期電動機とは対照的に、BLDCモーターはブロック状の電圧で駆動し、台形状の電流を流すのが一般的です。台形型制御は、1回転に60度間隔で6回の整流を行うため、矩形波制御、6ステップ制御とも呼ばれる。これは最も単純なBLDCモーター制御アルゴリズムです。電動工具としては許容できる性能ですが、矩形波制御は三相モーターの電気的回転周波数の6倍の周波数のトルクリップルを発生させることが知られています。これは、ステーターとローターの界磁が常に垂直でないような相間の離散的なスイッチングによる振動や音響ノイズにつながります。このため、高いトルクリップルが発生し、必然的に振動や騒音が発生します。
三相機械では、整流ステップごとに一対の巻線の間に電流経路が形成され、3番目の巻線は切り離された状態になります。ホールセンサー出力は、ローター永久磁石のどの極に近接しているか (現在の位置) によって、ハイまたはローになります。回転中、ローターのN極・S極のインターフェースの1つがホールセンサーを通過すると、その出力がトグルし、その後コントローラーはDC電圧を次のフェーズ (以下、「A」、「B」または「C」として示す) に切り替えます。XMC1400シリーズ マイクロコントローラーは、この制御アルゴリズムを実行するのに十分な処理能力を備えています。下図のように、電圧は長方形の形状をしており、その結果、機械内の電流と逆起電力は台形になります。

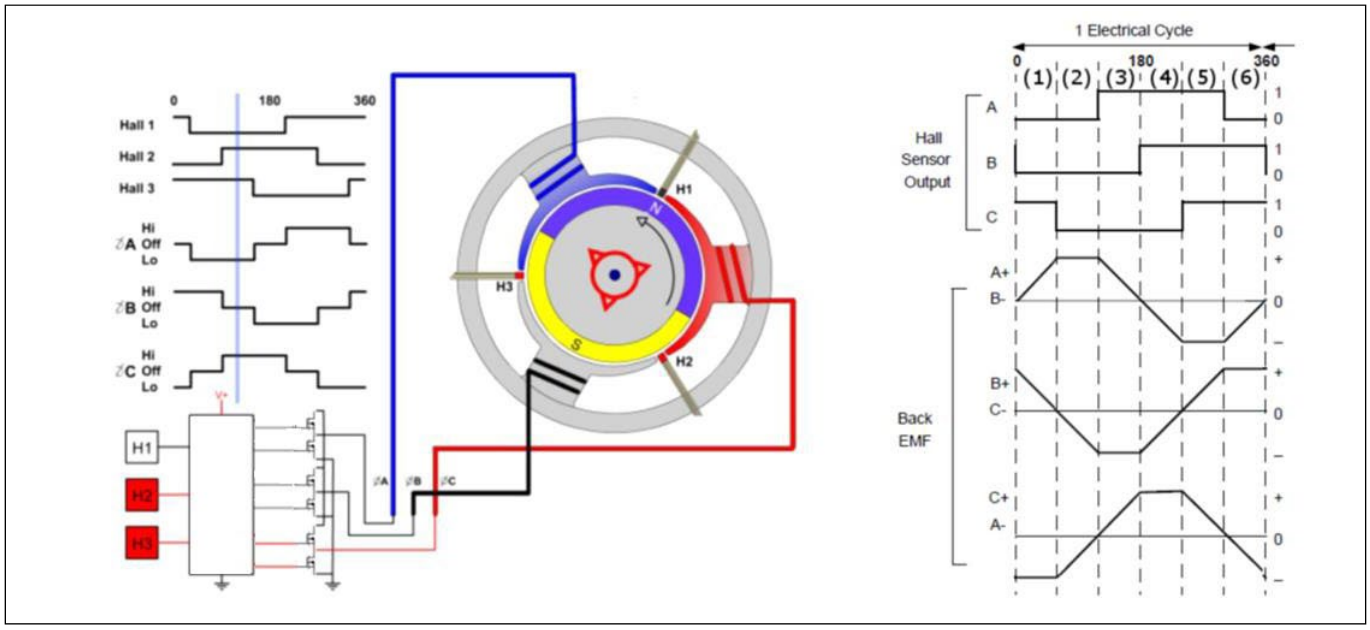

図 38 ホールセンサーによるBLDCモーターの制御

各整流ステップの間、一番目の巻線には電流が流れ込み、二番目の巻線からは電流が流れ出し、三番目の巻線は無通電の開回路状態になっています。トルクは、ステータコイルと永久磁石が発生する磁界の相互作用によって発生します。理想的には、この2つの磁場が互いに90度の関係であるときにピークトルクが発生し、磁場が一致する方向に移動するにつれて落ちていきます。

ホールセンサーを用いた典型的なBLDC台形制御矩形波制御システムのブロック図を以下に示します。

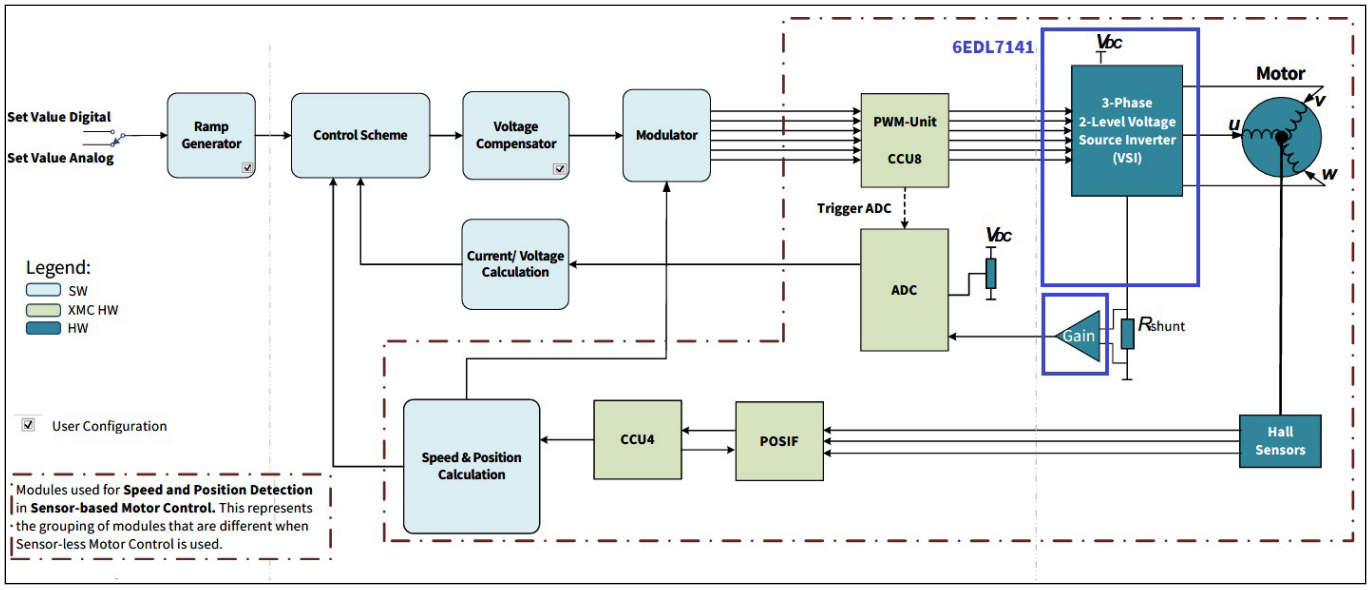

図 39　台形/矩形波制御アルゴリズムのブロック図

スイッチングパターンを下図に示します。EVAL6EDL7141_BLDC_1SHの実装では、6PWMモードが使用され、ハイサイドとローサイドのゲート駆動パルスはすべてマイクロコントローラーで生成され、ホールセンサー出力も感知します。ファームウェアは、インフィニオンが開発したBLDC_SCALAR_HALL_XMC13プラットフォームをベースにしています。

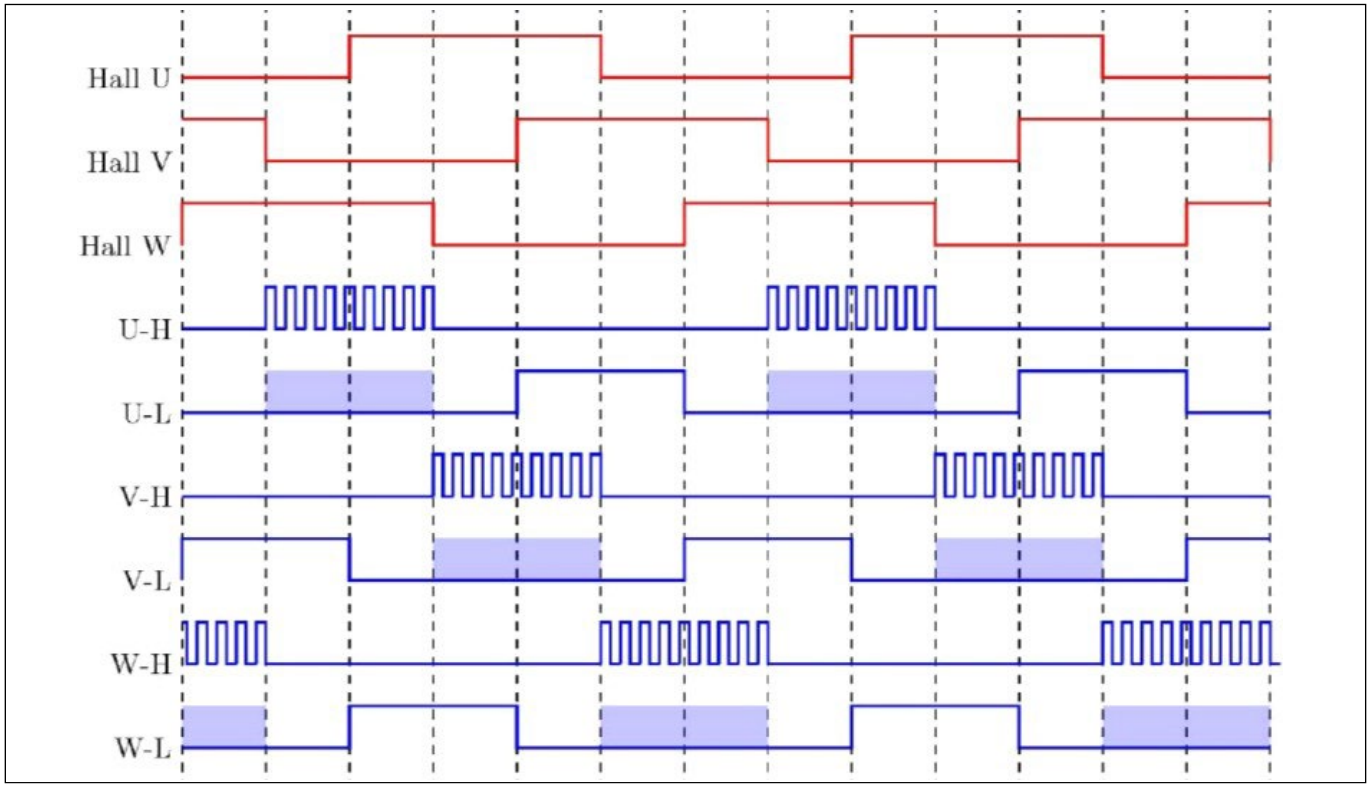

図 40　台形/矩形波制御のスイッチングパターン

5.2 P-I 制御ブロック図

ゲイン係数KPとKIは、次節で説明する他のパラメーターとともに、GUIファームウェア オプション (XMC1400 -> Control loop) で選択することが可能です。このファームウェアは、GUIフラッシュ ファームウェア オプションを使用して、ターゲット ボードのマイコンにプログラムすることができます。

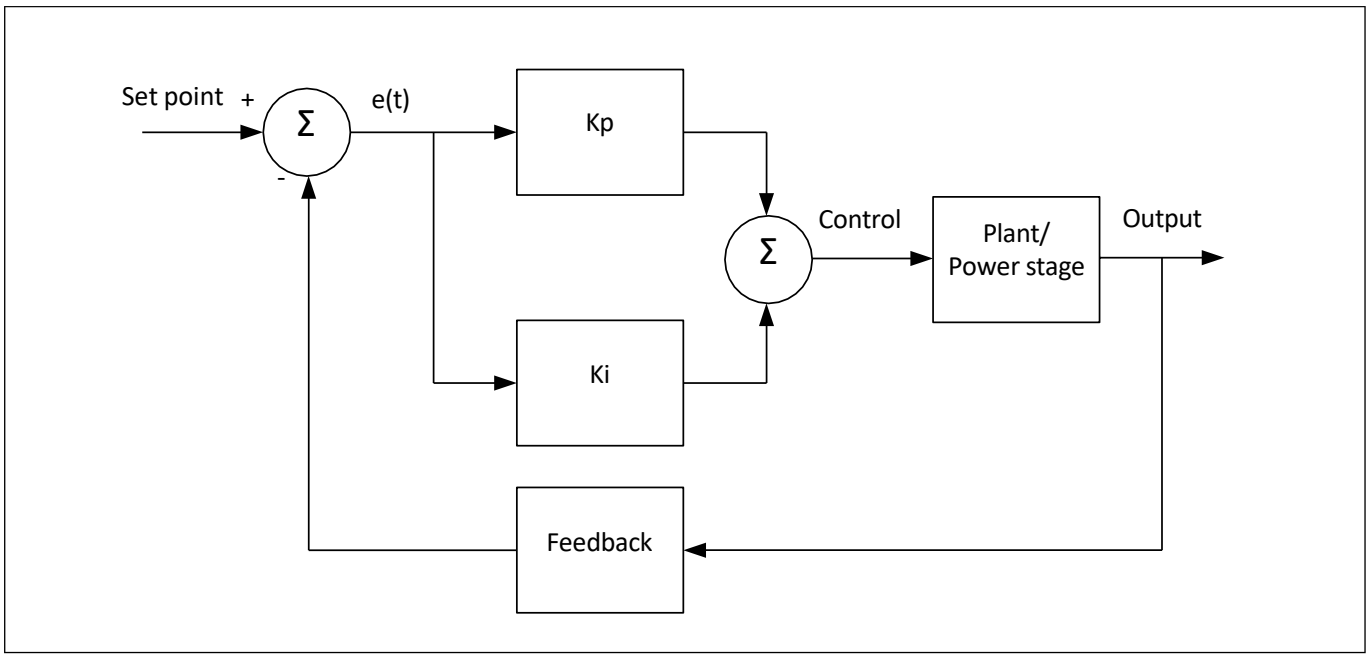

図 41 P-I 制御ブロック図

P-I コントローラーは広く使われているフィードバック制御機構で、測定された出力量 (この場合は回転数) の設定値と実際の測定値との差である誤差値 e(t) を連続的に計算するものです。この場合、速度はファームウェアによってホールセンサー入力信号から導き出されます。
誤差の値は比例計算機に送られ、K_Pが掛けられ、積分計算機に送られ、時間に対して積分され、その結果がK_Iで掛けられます。この2つの結果が合計されて制御値となり、パワーステージに適用されて、出力を設定値に合わせるための補正が行われます。目標は、特定のシステム (インバーターとモーター) に対してK_PとK_Iの値を最適化し、指令速度を変更したときの遅延とオーバーシュートを最小にすることです。

.

6 グラフィカルユーザーインターフェイス

6EDLMC GUIは、1個または3個のシャントによる台形制御またはフィールド指向制御で動作するモーター制御ボード上の6EDL7141の制御ファームウェアと構成設定をダウンロードします。特定のプロジェクトのパラメーターを選択すると、設定を保存することができます。オープニング画面は以下の通りです。

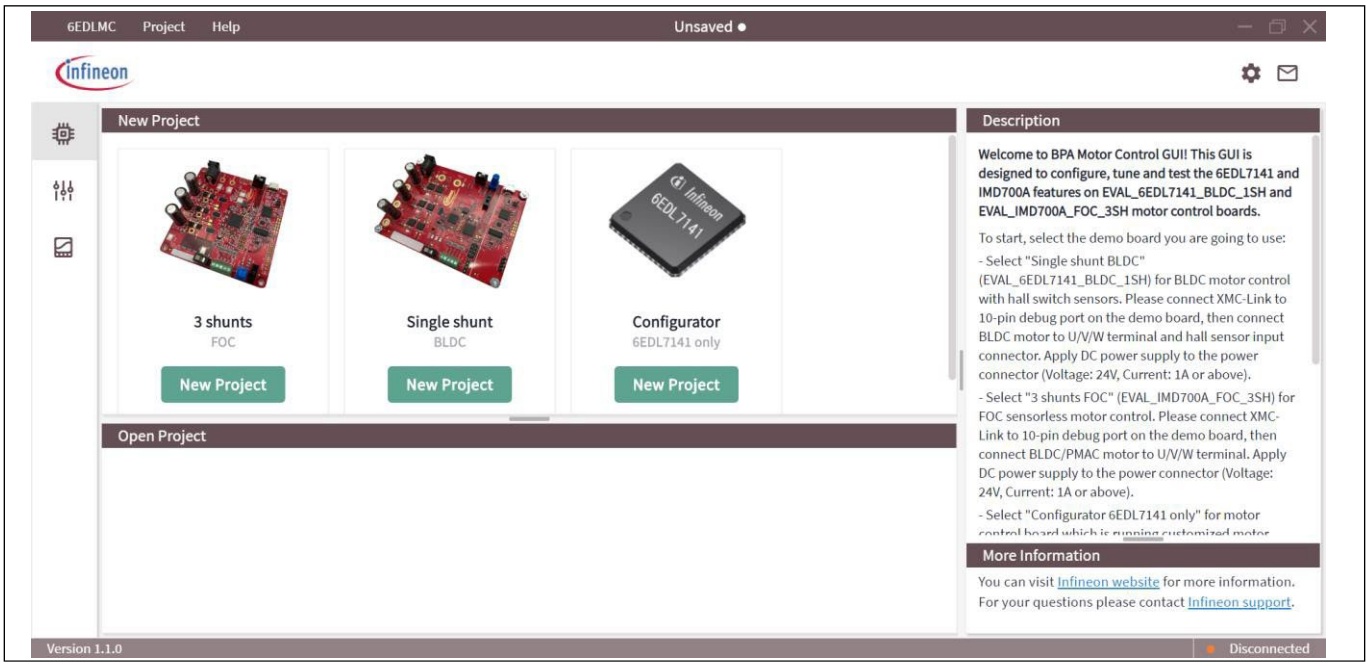

図 42 6EDLMC GUIのオープニング画面

新しいプロジェクトを開始するには、まず3つのオプションから必要な構成を選択します。
EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH 評価ボードは、BLDC 用のシングルシャント設計で、選択すると GUI が次の画面になります。次に、Parameter ControlsパネルのXMC1400オプションからドロップダウン メニューを展開します。

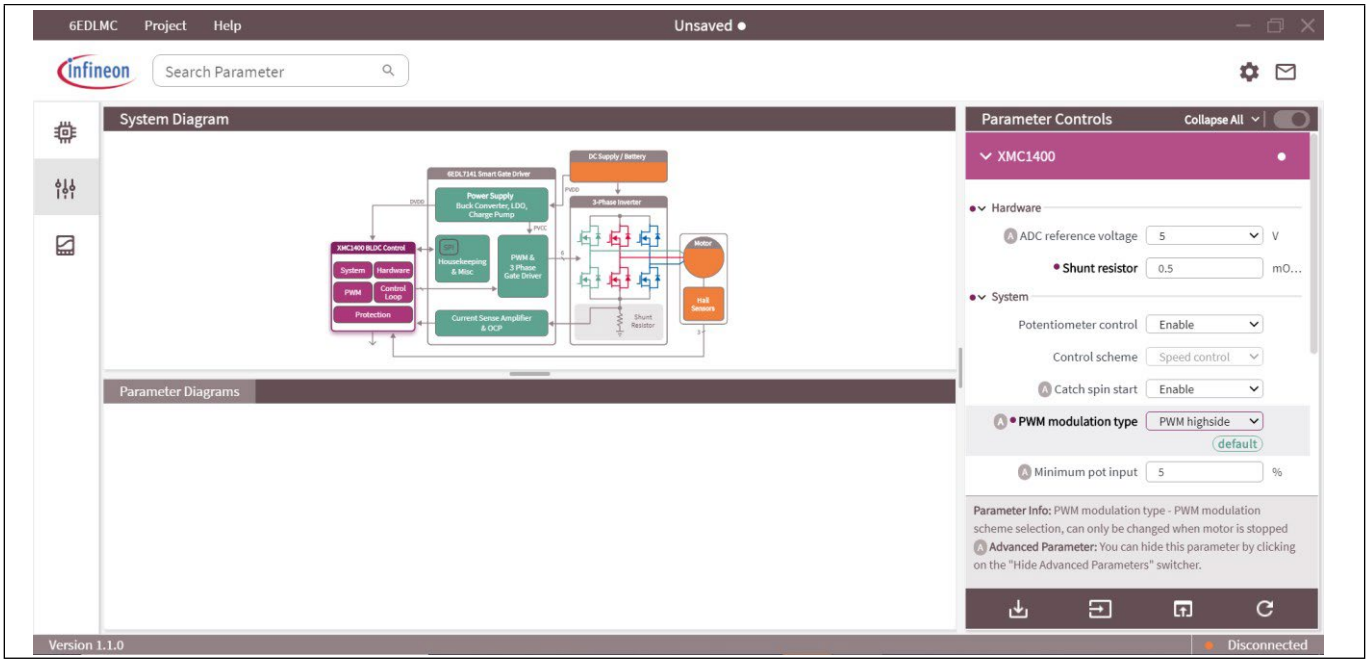

図 43 シングルシャント ファームウェアによる台形制御の設定メニュー

6.1 GUIからのファームウェアのダウンロード

GUIからの6EDL7141パラメーターの転送をサポートするためには、ファームウェアにそれをサポートする機能が含まれている必要があります。EVAL_6EDL71741_TRAP_1SHボードには、正しいファームウェアとパラメーターがプレインストールされています。
GUIには、互換性のあるモーター駆動ボードにダウンロード可能な一連のファームウェアオプションが含まれています。上図の右側には、6EDL7141またはIMD700/1 Aを内蔵したXMC1400マイクロコントローラーを使用する、XMC1400が拡大表示され、使用できるファームウェア オプションが示されています。下図は、PWM周波数やデッドタイムなど、利用可能なファームウェア オプションの一部を表示したものです。[3]

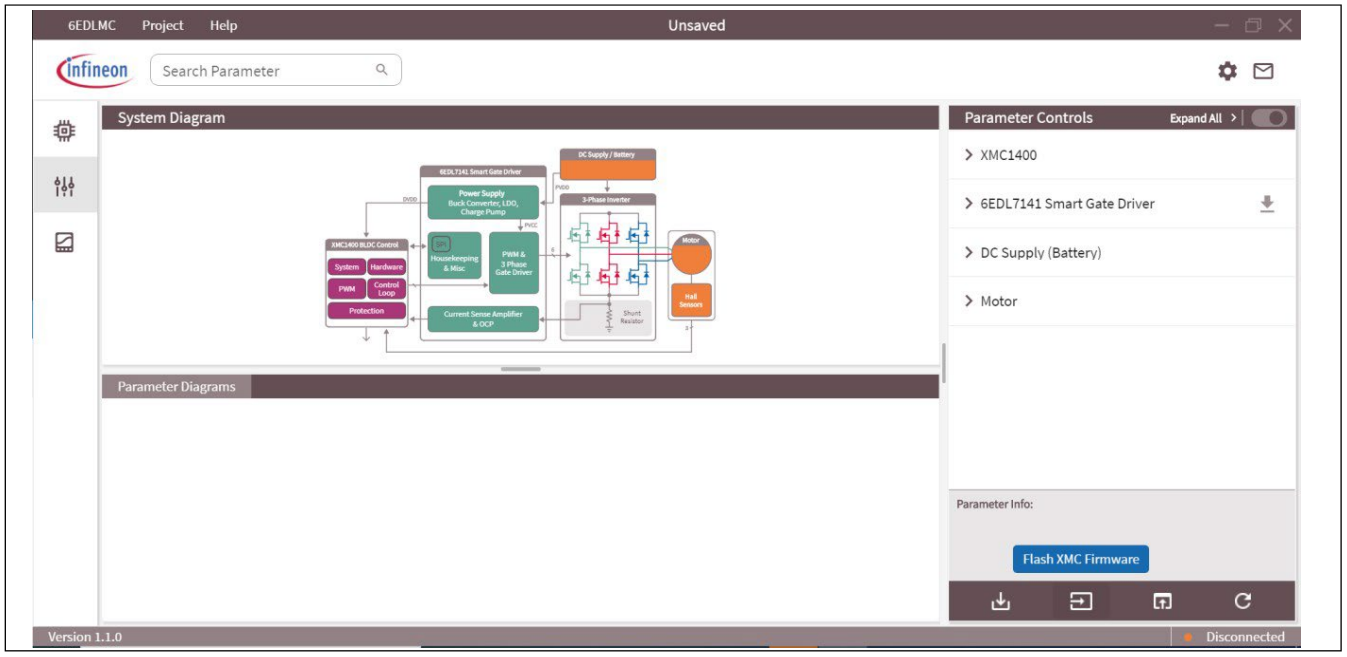

図 44 ファームウェアのオプションとダウンロード

ダウンロードの前に選択すべき重要なファームウェアのパラメーターがいくつかあり、以下の表に示します。GUI でファームウェアのパラメーターを選択したら、上図のように "Flash Firmware "ボタンをクリックして、USB ケーブル経由でファームウェアをボードにダウンロードすることができます。ファームウェアがマイクロコントローラーに正常にプログラムされたことを知らせるメッセージが表示されます。

表 5 ファームウェアのパラメーター一覧

Parameter	Description	Value	Unit
ADC reference voltage	V_{ADC} reference voltage, same as DVDD	5	V
Shunt resistor	BOM RS1	0.5	mΩ
Potentiometer control	Enable hardware potentiometer	Enable	
Control scheme	Select command parameter	Speed control	
Catch spin start	Catch start a rotating motor	Enable	
PWM modulation type	Select PWM modulation scheme Refer to section 4.1	High-side sync	
Minimum pot. input	Minimum potentiometer input level	5	%
Stall detection time	Delay on stall detection response	1.2	Seconds

[3] In 6PWM mode the dead-time is set by the microcontroller or 6EDL7141, whichever is greater. In other modes it is set by the 6EDL7141

Stall min. amplitude	When amplitude of setpoint is below this value, stall detection is disabled	10%	%
Stall	Enable/disable stall detection	Enable	
Overvoltage threshold	DC-link overvoltage threshold	30	V
DC-link overvoltage	Enable/disable overvoltage protection	Enable	
Undervoltage threshold	DC-link undervoltage threshold	16	V
DC-link undervoltage	Enable/disable undervoltage protection	Enable	
TRAP	Enable/disable overcurrent protection	Enable	
Wrong Hall	Enable/disable incorrect Hall sensor connection detection and shutdown	Enable	
Hall learning	Enable/disable Hall sensor learning	Enable	
SPI timeout error	Enable/disable SPI timeout error	Enable	
PWM frequency	PWM switching frequency	20	kHz
Dead-time rising	PWM dead-time for rising edge	0.44	µs
Dead-time falling	PWM dead-time for falling edge	0.44	µs
DC bus compensation	Enable/disable DC bus compensation	Disable	
Current sense delay	Current sense ADC trigger delay from center of PWM on-time	0.75	µs
Maximum duty cycle	Maximum PWM output duty cycle	100	%
Demag blanking time	Demagnetization blanking time for skipping DC-link current measure after PWM commutation	100	µs
Phase advance speed	Phase advance starting speed, advance angle increase linearly above this speed	1000	RPM
Phase advance angle	Maximum phase advance angle (at maximum speed), set 0 to disable phase advance	30	Degrees
Ramp-up time	Ramp-up time from zero to maximum speed	0.5	Seconds
Ramp-down time	Ramp-down time from maximum speed to zero	0.5	Seconds
Ramp-down hold voltage	Maximum DC-link voltage that allows ramp-down, ramp-down will be hold if DC-link voltage above the threshold	28	V
Speed control rate	Speed control execution rate in number of PWM cycles	1	
Speed K_P	P-I control parameter: proportional	200	
Speed K_I	P-I control parameter: integral	10	
Speed P-I limit	Speed P-I regulator voltage output limit	100	%

6.2 6EDL7141のパラメーターを設定する

PWM構成とゲートドライバー パラメーターは、PWMと三相ゲートドライバーメニューを展開し、選択肢の中から各パラメーターを選択することで選択できます。

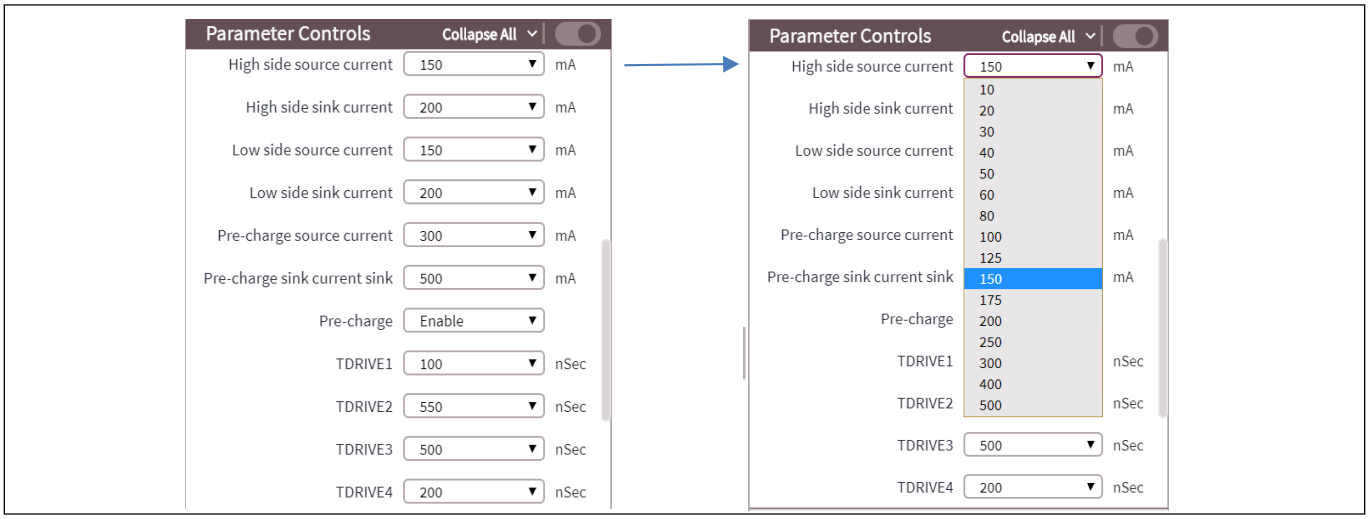

図 45 ゲートドライブ パラメーターの選択

GUI では，前節で説明したオンボード電源やチャージポンプの設定，電流センスアンプや過電流保護 の閾値など、6EDL7141 の選択可能なすべてのパラメーターを設定することが可能です。
ファームウェア オプションと6EDL7141のパラメーターをすべて選択したら、画面上部の "Project "メニューからプロジェクトを保存する必要があります。プロジェクトファイルの拡張子は.6EDLです。
6EDL7141を搭載したターゲット ボードをPCに接続するには、XMC™ Link デバッガーを介して PC に接続できます。ただし、EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH 評価ボードには独自のオンボードデバッガーがあり、PC の USB ポートに直接接続できるため、この方法は必要ではありません。6EDL7141 は、以下のオプションを使用して、選択した値でプログラムすることができます。



図 46 設定を6EDL7141に転送する場合

「Write Parameters」オプションは、設定を揮発性メモリーに転送し、6EDL7141 に電源が供給されている間だけ残ります。このオプションは、ベンチテストや最適化の際に、すべての正しい値が選択されたと設計者が完全に納得するまで使用する必要があります。ベンチ評価中に値が変更された場合、プロジェクトを再度保存する必要があります。設計者が最終的な値を得たことを確認したら、「Burn 6EDL7141 OTP」オプションを使用して、ワンタイムプログラマブル(OTP) メモリーに構成を恒久的に設定することができます。

表 6　6EDL7141 の追加パラメーター一覧

Parameter	Value	Unit
Power supply		
PVCC setpoint	12	V
Charge pump clock frequency	781.25	kHz
Charge pump spread spectrum	Enable	
Charge pump pre-charge	Disable	
Buck converter frequency	500	kHz
DVDD setpoint	V_SENSE pin	
DVDD soft-start time	100	µs
DVDD turn-on delay	200	µs
DVDD OCP threshold	450	mV
PWM and three-phase gate driver[1]		
PWM mode	6 PWM	
PWM freewheeling mode	Active FW	
Brake configuration	Low-side	
Alternate recirculation	Disable	
Pre-charge	Enable	
Current sense and OCP		
Amplifier A	Disable	
Amplifier B	Enable	
Amplifier C	Disable	
Amplifier gain	8x	
Amplifier gain analog select	Disable	
Amplifier mode	Shunt resistor	
Internal offset selection	¼ DVDD	
Use external offset	Disable	
Amplifier timing mode	GLx high	
Amplifier blanking time	1000	ns
Amplifier auto zero	Internal trigger	
OCP positive threshold	300	mV
OCP negative threshold	-300	mV
PWM truncation	Enable	
OCP deglitch time	8	µs
OCP fault trigger	8 events	
OCP fault latching	Disable	
Brake on OCP	Enable	
Negative OCP	Enable	

[1] Refer to Table 3 for parameters not listed here

Housekeeping		
Hall sensor deglitch time	640	ns
Overtemperature shutdown	Enable	
ADC measurement filter	8	
APC PVDD measurement filter	32	
Watchdog (WD) timer	Disable	
WD input selection	EN_DRV	
WD fault report	Status reg. only	
WD period time	100	µs
Buck converter WD	Enable	
Rotor lock detection time	1	s
Rotor lock detection	Disable	
WD fault latching	Disable	
Brake on WD timer overflow	Disable	
WD DVDD restart delay	0.5	ms
WD DVDD restart attempts	0	
User ID	0	

6.3 GUI によるボードの制御

また、このGUIは、下図のようなテストベンチ画面を通じて、EVAL_6EDL7141_TRAP_1SHなどの6EDL7141搭載モーター駆動インバーターの操作/監視が可能です。

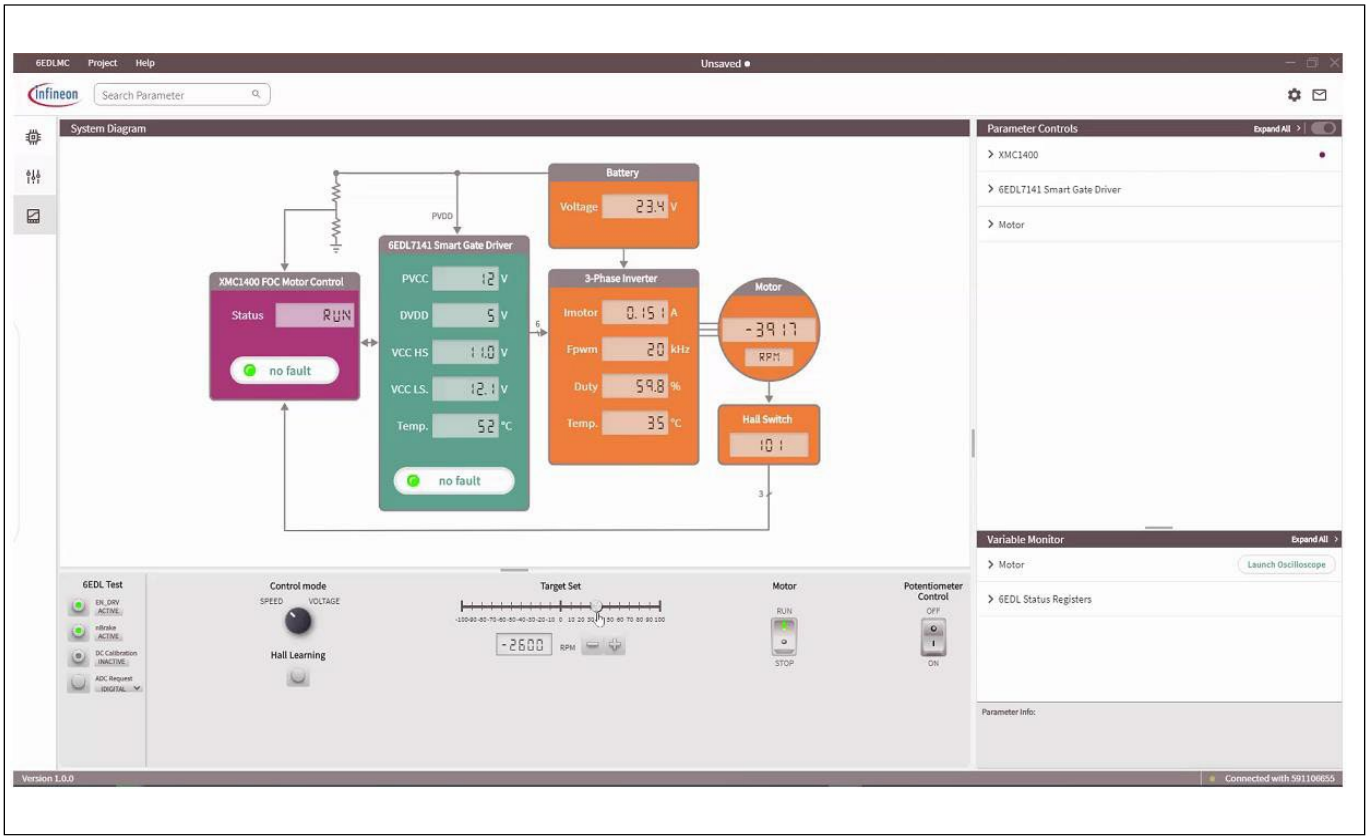

図 47 GUI テストベンチ画面

テストベンチ画面では、電源電圧、内部レギュレーター電圧、チャージポンプ電圧、バッテリー入力電圧などのシステム パラメーターをリアルタイムに表示することが可能です。また、ローター回転数 (RPM)、モーター電流、PWMスイッチング周波数とデューティサイクル、内蔵センサーによる6EDL7141の温度も表示されます。また、故障の状態も表示されます。
また、このGUI画面では、モニタリングだけでなく、画面下部の「Target Set」スライダーコントロールにより、モーターの方向や速度を指令することも可能です。また、モータースイッチによるモーターの起動/停止や、基板に実装された速度制御用ポテンショメーターの有効/無効の切り替えも可能です。GUI から速度制御を行うには、右側のポテンショメーター制御スイッチが OFF になっていなければなりません。

7 部品構成 (BOM)

Reference	Qty	Value/Rating	Manufacturer	Part number
C01, C2, C324	3	270 µF/35 V/20%	United Chemi-Con	EKZE350ELL271MH20D
C3, C20, C28	3	2.2 µF/50 V/0603	Murata	GRM188R61H225KE11D
C4, C18, C26, C36, C37	5	4.7 µF/50 V/0805	Murata	GRM21BR61H475KE51L
C5, C6, C7, C8, C9, C10, C11, C12	8	2.2 µF/50 V/0603	Murata	GRM188R61H225ME11D
C13, C14, C21, C23, C29, C31	6	33 nF/100 V/0603	TDK	CGA3E3X8R2A333K080AB
C16, C57	2	0.1 µF/25 V/0402	Samsung	CL05A104KA5NNNC
C19	1	330 pF/50 V/0402	Murata	GCM155R71H331KA37D
C25	1	100 pF/25 V/0402	KEMET	C0402C101J3GACTU
C30, C32	2	2.2 µF/25 V/0805	Samsung	CL21A225KAFNNNG
C33	1	0.22 µF/50 V/0805	KEMET	C0805C224K5RACAUTO
C34	1	0.1 µF/10 V/0402	Samsung	CL05A104KP5NNNC
C35	1	10 µF/10 V/0402	Samsung	CL05A106MP5NUNC
C38	1	0.1 µF/50 V/0603	Yageo	CC0603KRX7R0BB104
C39	1	0.22 µF/25 V/0402	Murata	GRT155R61E224ME01D
C40, C41	2	22 µF/20%/16 V	Samsung	CL10A226MO7JZNC
C42	1	10 µF/25 V/0805	Samsung	CL21A106KAFN3NE
C43, C45, C47, C49, C50	5	220 nF/10 V/0402	TDK	GRM155R61A224KE19J
C44, C46, C48, C51, C58	5	1 µF/10%/25 V	Samsung	CL10A105KA8NNNC
C52, C53, C54, C55	4	10000 pF/25 V/0603	AVX	06033D103KAT2A
C56	1	1 µF/10%/10 V/0402	Murata	GRM155C81A105KA12D
C301, C305, C306, C308, C309, C310, C311, C312, C318, C319, C320	11	100 nF/25 V/0402	Vishay Vitramon	VJ0402Y104KXXCW1BC
C302, C303	2	15 pF/25 V/0402	Walsin Technology	0402N150J250CT
C304	1	10 nF/25 V/0402	KEMET	C0402C103J3RACAUTO
C307	1	4.7 µF/25 V/0603	Taiyo Yuden	TMK107BBJ475MA-T

部品構成 (BOM)

C313, C315	2	10 µF/16 V/0603	TDK	GRM188R61E106MA73J
C314	1	10 nF/16 V/0402	KEMET	C0402C103J3RACAUTO
C316, C317	2	1 µF/6.3 V/0402	Taiyo Yuden	JMK105BJ105KV-F
C321, C322, C323	3	2200 pF/50 V/0402	TDK Corporation	C1005X5R1H222K050BA
D1	1	100 V/2 A/SMA	ST Microelectronics	STPS2H100AY
D2, D3, D4, D5, D8	5	5.1 V/500 mW	ON Semi	MM5Z5V1T1G
D6, D7	2	30 V/500 mA/SC79-2	Infineon	BAS3005A02VH6327XTSA1
D14	1	TVS diode/22 V/35.5 V/SMA	Diodes	SMAJ22A-FDICT-ND
D301	1	30 V/1 A/SOD323	Infineon	BAS3010A-03W
D302	1	TVS diode/5.3 V/TSLP-3	Infineon	ESD5V3U2U-03LRH E6327
F1	1	10 A/32 V AC/63 V DC	Littelfuse	0458010.DR
HS1	1	Heatsink 40 x 20 x 12 mm	Alpha Novatech	LPD4020-10B
IC301	1	XMC4200_QFN48	Infineon	XMC4200Q48K256BAXUMA1
IC302	1	IFX54441LDV	Infineon	IFX54441LDVXUMA1
IC303	1	SI866X	Silicon Labs	634-SI8662BB-B-IS1
IC304	1	74LVC1G126GW	Nexperia	74LVC1G126GW,125
J1, J2, J4, J5, J6	5	Banana Jack	Keystone Electronics	476-4
J3	1	Jack 5.5 x 2.1 mm	Tensility International Corp	54-00129
J9	1	Conn. header vert./8POS/2.54 m	Adam Tech	PH2-08-UA
LED1, LED4, LED302	3	LED red clear	Osram	LS Q976-NR-1
LED2	1	LED blue diffused	Osram	LB Q39G-L2OO-35-1
LED3, LED5, LED301	3	LED green diffused	Rohm	SML-D12M8WT86
L1	1	22 µH/1.2 A/4020	Bourns	SRP4020TA-220M
L301	1	Ferrite bead/60 Ω/0603 1LN	Würth Elektronik	74279267
POT1	1	10k pot. 1-turn	Bourns	3362P-1-103TLF
Q1, Q2, Q3, Q4, Q5, Q6	6	40 V, 0.7 mΩ, SuperSO8 5x6 package	Infineon	BSC007N04LS6

Q301	1	Crystal/12.0000 MHz/8 pF/SMD	Kyocera	CX3225GA12000D0PTVCC
RS1	1	500 µΩ/3 W/2512/1%	TE Connectivity	TLR3A30ER0005FTDG
RT1	1	Low-power linear active thermistor ICs	Microchip	MCP9700T-E/TT
R1, R8, R16, R23, R34, R37	6	1 Ω/0.1 W/0603/1%	Yageo	RC0603FR-071RL
R2	1	75k/0.1 W/0603/1%	Panasonic	ERJ-3EKF7502V
R3, R7, R17, R25, R35, R40, R48, R320, R321, R322, R323	11	0 R/0.1 W/0402	Panasonic	ERJ-2GE0R00X
R5	1	7.87k/0.1 W/0603/1%	Yageo	RC0603FR-077K87L
R6, R24, R38	3	56k/0.1 W/0603/1%	Yageo	RC0603FR-0756KL
R10, R29, R42	3	5.6k/0.1 W/0603/1%	Panasonic	ERJ-3EKF1651V
R11	1	100k/0.1 W/0603/1%	Yageo	RC0603FR-07100KL
R13	1	22k/0.1 W/0603/1%	Yageo	RC0603FR-0722KL
R14	1	3.3k/0.1 W/0402/1%	KOA Speer Electronics	RK73B1ETTP332J
R15	1	470 R/0.1 W/0402/1%	Panasonic	ERJ-2RKF4700X
R18	1	1.8k/0.063 W/0402/0.1%	Panasonic	ERA-2AEB182X
R19, R22, R26, R33, R39, R50, R62, R63	8	5.1k/0.1 W/0402/5%	Panasonic	ERJ-2GEJ512X
R44, R312, R309, R311	4	10k/0.063 W/0402/5%	Yageo	RC0402JR-0710KL
R45, R46	2	10k/0.1 W/0603/5%	Yageo	RC0603JR-0710KL
R51	1	1k/0.1 W/0603/1%	Yageo	RC0603FR-071KL
R53, R54, R55	3	2.2k/0.1 W/0603/1%	Yageo	RC0603FR-072K2L
R56, R57, R58	3	3.3k/0.1 W/0603/1%	Yageo	RT0603FRE073K3L
R61	1	100 R/0.063 W/1%/0402	Yageo	RC0402FR-07100RL
R64	1	200 R/0.1 W/0603/1%	Yageo	AC0603FR-07200RL
R301, R302	2	680 R/0.063 W/0402/1%	Vishay Dale	CRCW0402680RFKEDC
R303	1	82k/0.1 W/0603/1%	Panasonic	ERJ-3EKF8202V
R304	1	48.7k/0.1 W/0603/1%	Yageo	RC0603FR-0748K7L

部品構成 (BOM)

R305	1	510 R/0.1 W/0402/1%	Panasonic	ERJ-U02F5100X
R306, R307	2	22 R/0.1 W/0402/5%	Panasonic	ERJ-2GEJ220X
R308	1	4k7/0.1 W/0402/1%	Panasonic	ERJ-2RKF4701X
R310, R314	2	1 M/0.1 W/0402/1%	Yageo	RC0402FR-071ML
R315, R316	2	0 R/0.1 W/0603	KOA Speer Electronics	RK73Z1HTTC
R317	1	3k/0.063 W/0402/1%	Yageo	RC0402FR-073KL
R318	1	32.4k/0.063 W/0402/1%	Bourns	CR0402-FX-3242GLFCT-ND
R319	1	1k/0.063 W/0402/1%	Yageo	RT0402FRE071KL
ST1, ST2, ST3, ST4	4	Hex Standoff Threaded #4-40 Aluminum 0.250" (6.35mm) 1/4" -	Keystone Electronics	8714
SW1	1	Slide switch SPDT/200 MA/30 V	E-Switch	EG1218
SW2	1	Slide switch SPST/0.4 VA/28 V	NKK Switches	AS11CP
U2	1	Three-phase smart gate driver	Infineon	6EDL7141
U3	1	32-bit microcontrollers with ARM® Cortex®-M0	Infineon	XMC1404-Q064X0200 AA
X3	1	Conn. term. block/2.54 mm/5POS	Phoenix Contact	MPT 0,5/ 5-2,54 - 1725685
X4, X5	2	Header/4 x 1/TH/0.025 sq/100 mil/SP	Molex, Amp	PH1-04-UA
X302C	1	Conn. receptor/USB2.0/MICRO AB/SMD RA	Würth Elektronik	629105150921

8 モーター仕様

今回使用したモーターは、Trinamic Motion Control GmbH社製の120度の相対角度で配置された3つのホールセンサーを持つQBL4208-61-04-013 BLDCモーターです。その仕様は以下の通りです。

- Hall effect angle: 120-degree electric angle
- Shaft run-out: 0.025 mm
- Insulation class: B
- Radial play: 0.02 mm, 450 G load
- Max. radial force: 28 N (10 mm from flange)
- Max. axial force: 10 N
- Dielectric strength: 500 V DC for 1 minute
- Insulation resistance: 100 MΩ min. 500 V DC
- Recommended ambient temp.: -20°C to +40°C
- Bearing: Brushless motors fitted with ball bearings

表 7 QBL4208モーターのテクニカルデータ

Specifications	**Unit**	**QBL 4208**			
		-41-04-006	-61-04-013	-81-04-019	-100-04-025
No. of poles		8	8	8	8
No. of phases		3	3	3	3
Rated voltage	V	24	24	24	24
Rated phase current	A	1.79	3.47	5.14	6.95
Rated speed	RPM	4000	4000	4000	4000
Rated torque	Nm	0.0625	0.125	0.185	0.25
Maximum peak torque	Nm	0.19	0.38	0.56	0.75
Torque constant	Nm/A	0.035	0.036	0.036	0.036
Line to line resistance	Ω	1.8	0.72	0.55	0.28
Line to line inductance	mH	2.6	1.2	0.8	0.54
Maximum peak current	A	5.4	10.6	15.5	20
Length (L_{MAX})	mm	41	61	81	100
Rotor inertia	$kgm^2 \times 10^{-6}$	24	48	72	96
Mass	kg	0.3	0.45	0.65	0.8

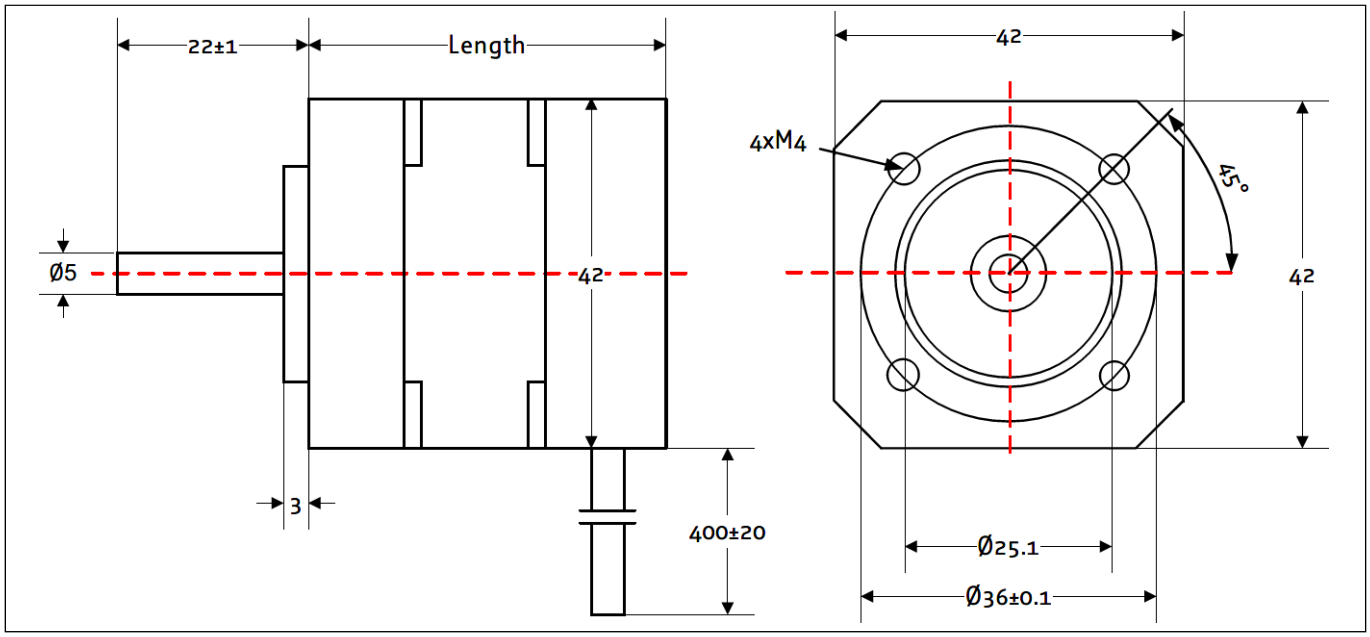

図 48　QBL4208-61-04-013 モーター寸法図

9 PCBレイアウト

EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH 評価ボードは、トップ層とボトム層に 2 オンスの銅、内部層に 1 オンスの銅を使用した 6 層 PCB を利用しています。コンポーネントは上面および下面に実装されています。幅は3.0インチ/76.2 mmで、長さは4.0インチ/101.6 mmです。

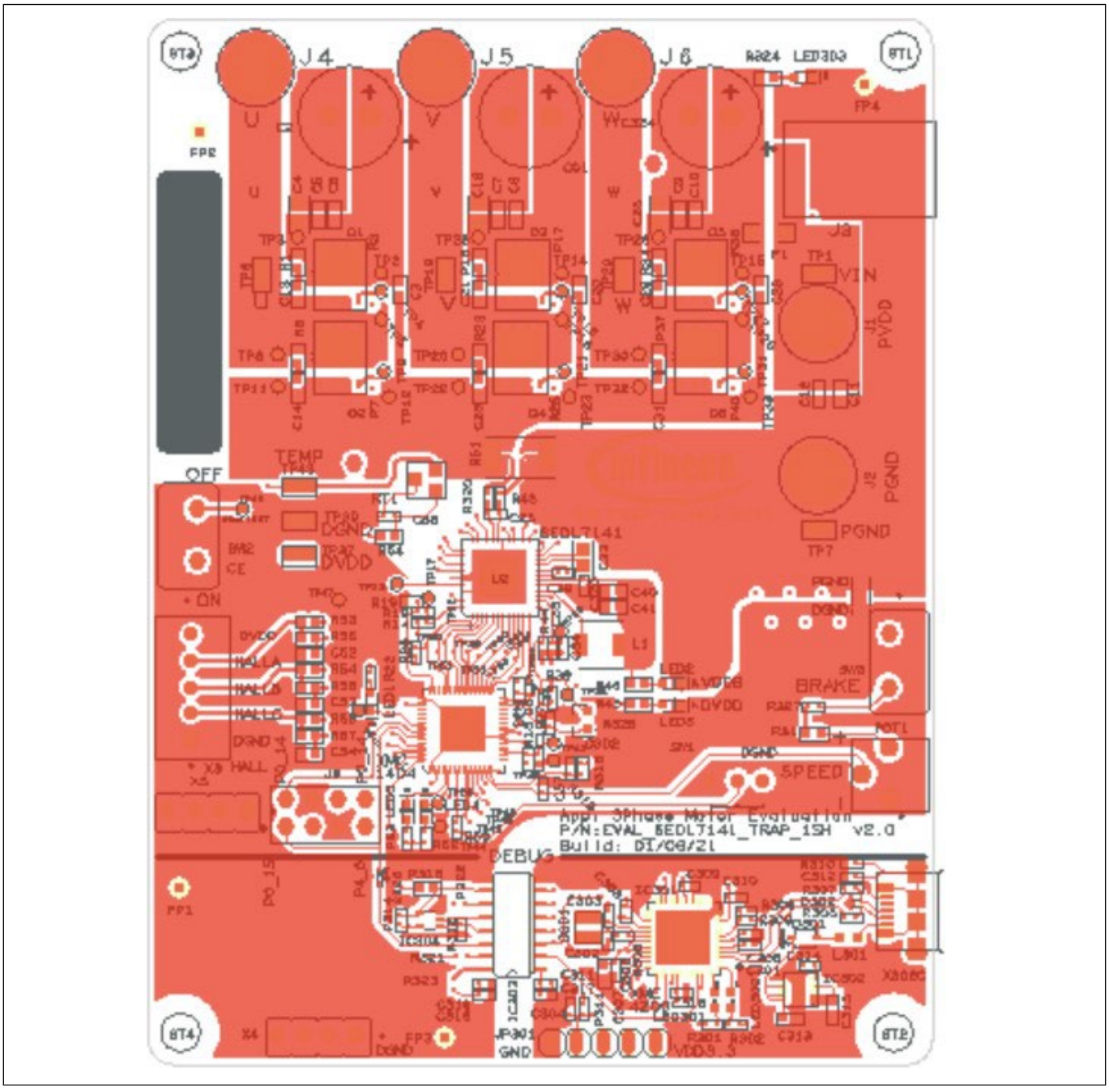

図 49 EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH PCB 上層部 (シルクスクリーン付き)

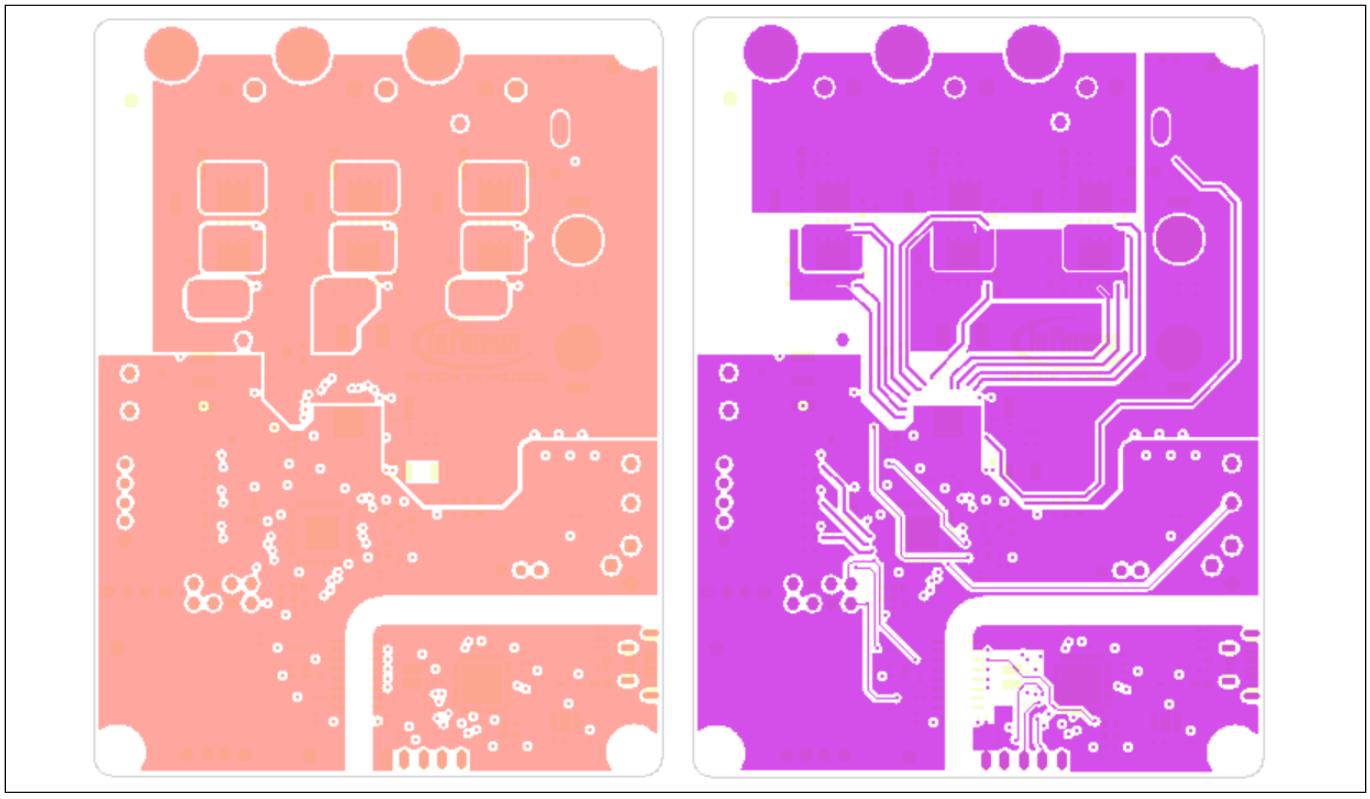

図 50　EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH　PCB 内部層 1 (左) GND、2 (右) GND

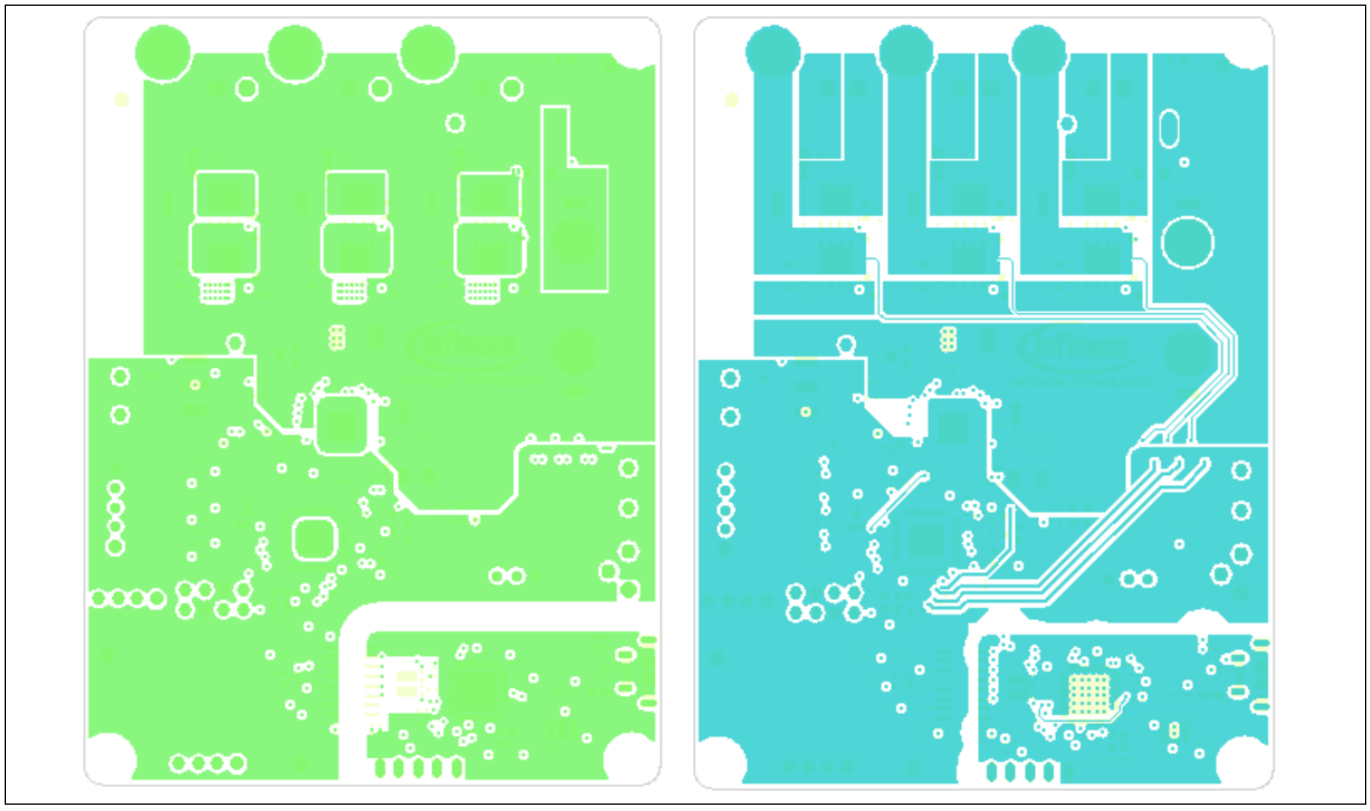

図 51　VAL_6EDL7141_TRAP_1SH　PCB 内部層 3 (左) DVDD と 4 (右)

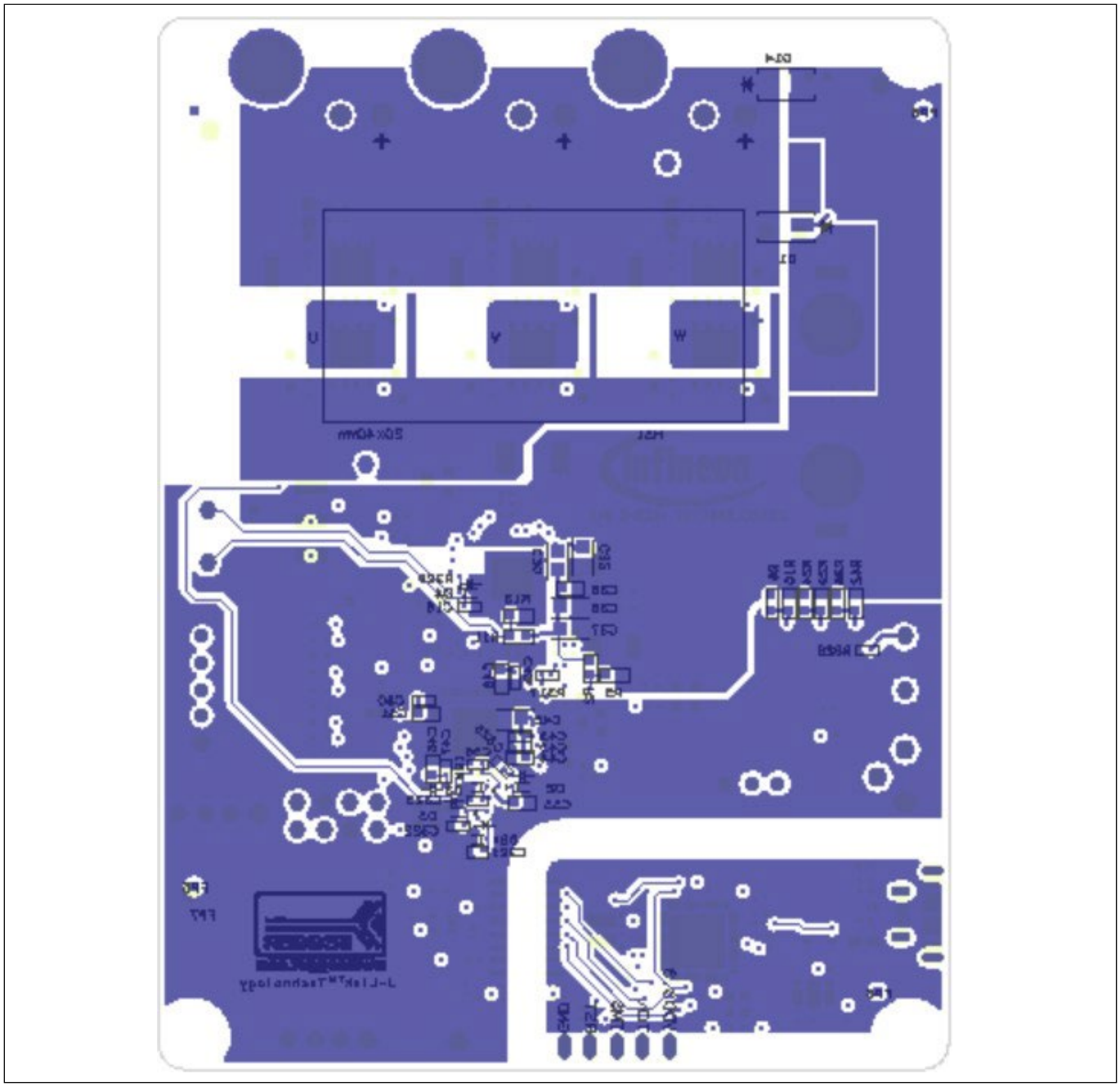

図 52　EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH PCB ボトムレイヤーとシルクスクリーン

プリント基板のレイアウトを最適化し、放射されるEMIを最小限に抑えています。これは、スイッチング電流を流すループを可能な限り小さくすることで実現されています。高周波スイッチング電流のループを下図に示します。スイッチング過渡応答の間、ハイサイド ゲート駆動ループ電流は、従来のハイサイド ドライバーのようにゲート ドライバーに戻るのではなく、メイン グランドに戻ることに注意する必要があります。このため、ハイサイドのゲートドライブ ループもできるだけタイトにしておく必要があります。トップ層はDCバスとトップ側MOSFETのドレインを接続し、最初の内部層は電流センスシャントを介してMOSFETの電流を返します。各フェーズのスイッチングループは、電解コンデンサーと高周波デカップリングコンデンサーで始まり、終了します。内部1層目のリターン トレースはパワートレースの下を通過するため、非常にタイトな高周波スイッチングループが形成されます。

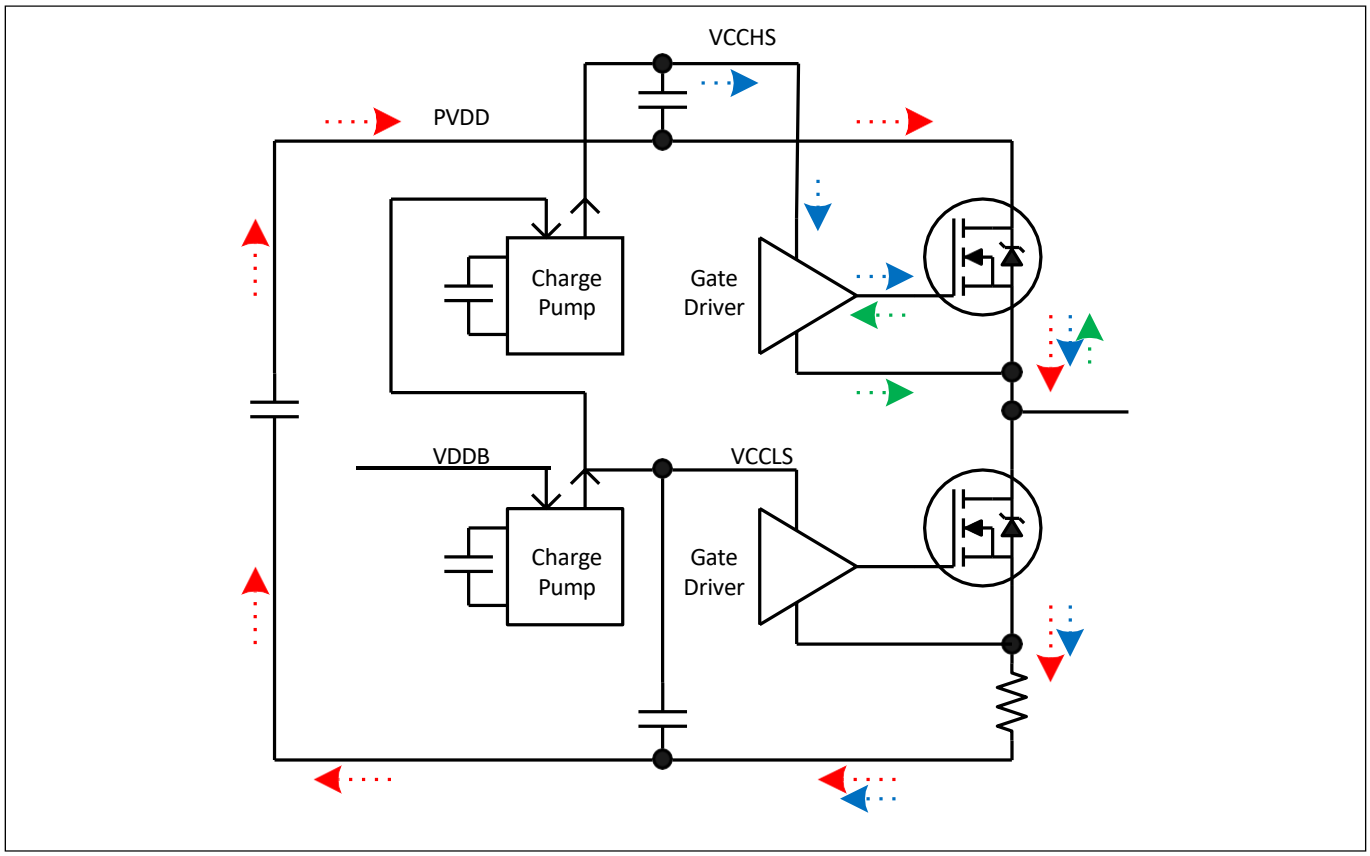

図 53　高周波電流ループ(1相)
赤：メインHFスイッチングループ、青：電流ループ上のハイサイドゲート駆動スイッチ
緑：ハイサイド ゲート駆動スイッチオフ電流ループ

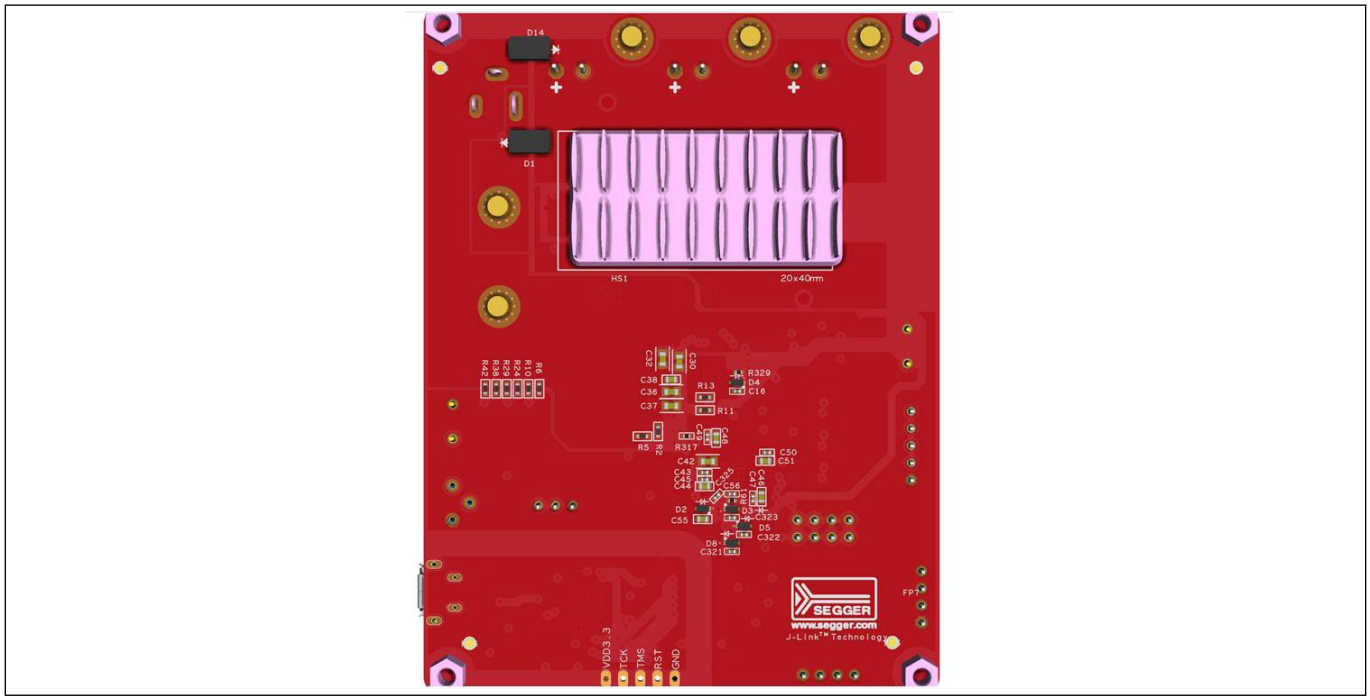

図 54　オプションのヒートシンクを取り付けた基板下面

10 テスト結果

10.1 動作波形

EVAL_6EDL7141_TRAP_1SHボードで、入力電圧18 V、入力電力300 W、モーターを1500rpmで駆動したときの波形を以下に示します。

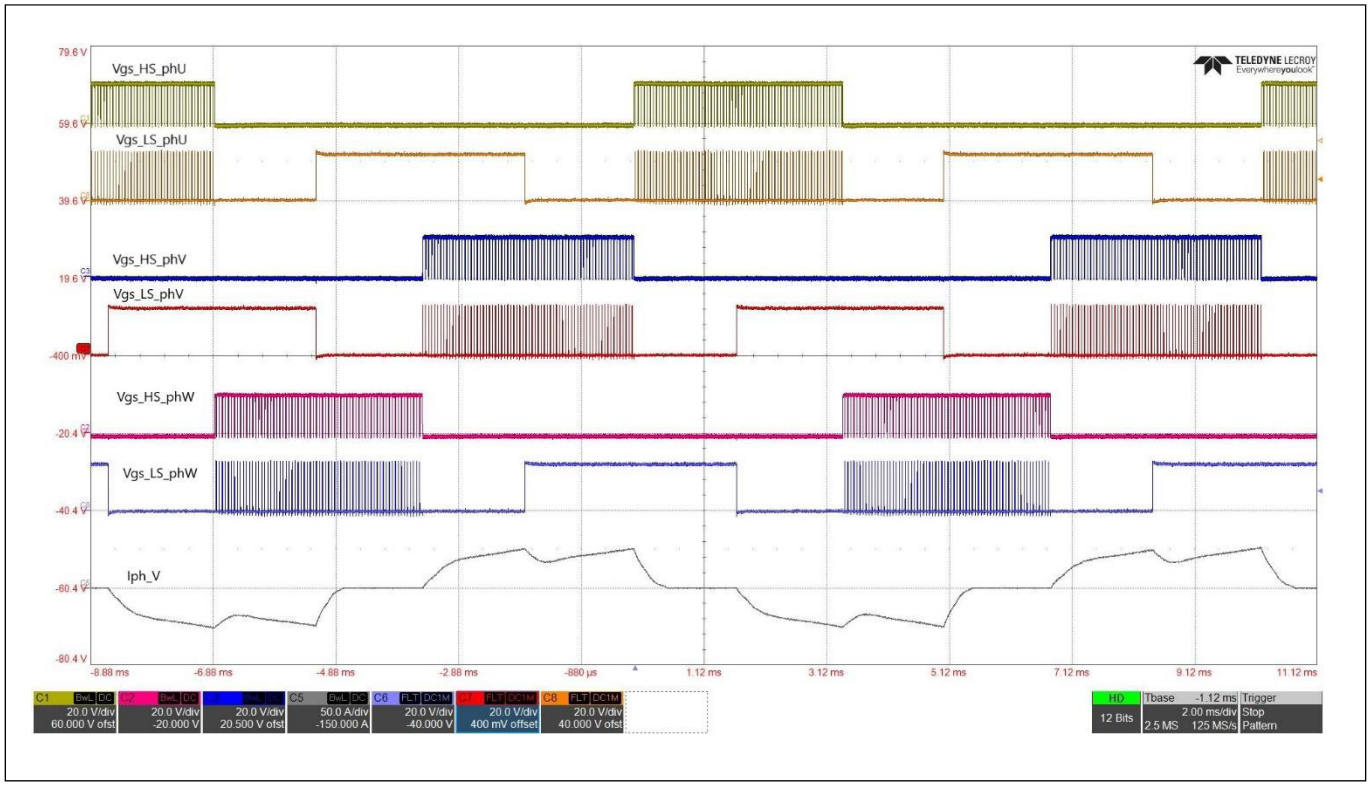

図 55 ハイサイド/ローサイド ゲートドライブ パルス (2ms/div)
$V_{GS_HS_phU}$ (黄), $V_{GS_LS_phU}$ (オレンジ), $V_{GS_HS_phV}$ (青), $V_{GS_LS_phV}$ (赤), $V_{GS_HS_phW}$ (ピンク), $V_{GS_LS_phW}$ (紫), I_{PHASE_phV} (グレー)

上の波形は、図 23に従ってローサイドを同期整流したハイサイドPWMですが、モーターの回転方向が逆なので、V相とW相の波形が入れ替わっています。相電流波形は典型的な台形/6ステップのプロファイルを示します。

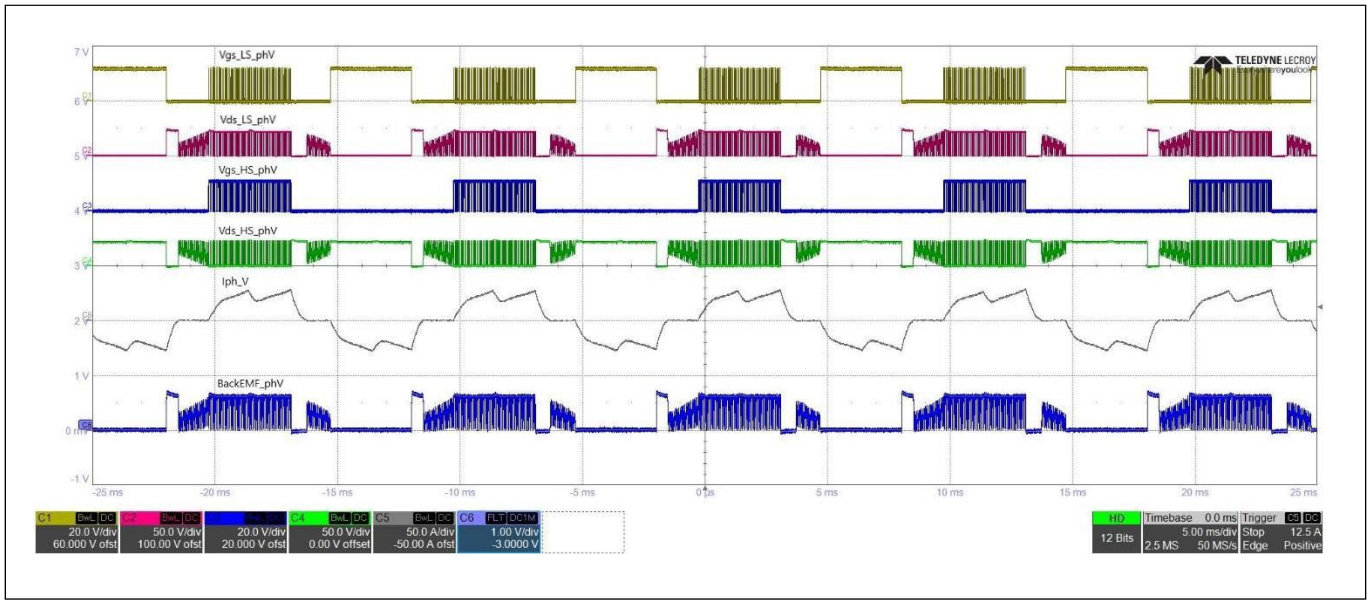

図 56　V相　波形　(5ms/div)
V_{GS_LS} (黄), V_{DS_LS} (赤), V_{GS_HS} (青), V_{DS_HS} (緑), I_{PHASE} (グレー), back EMF (青)

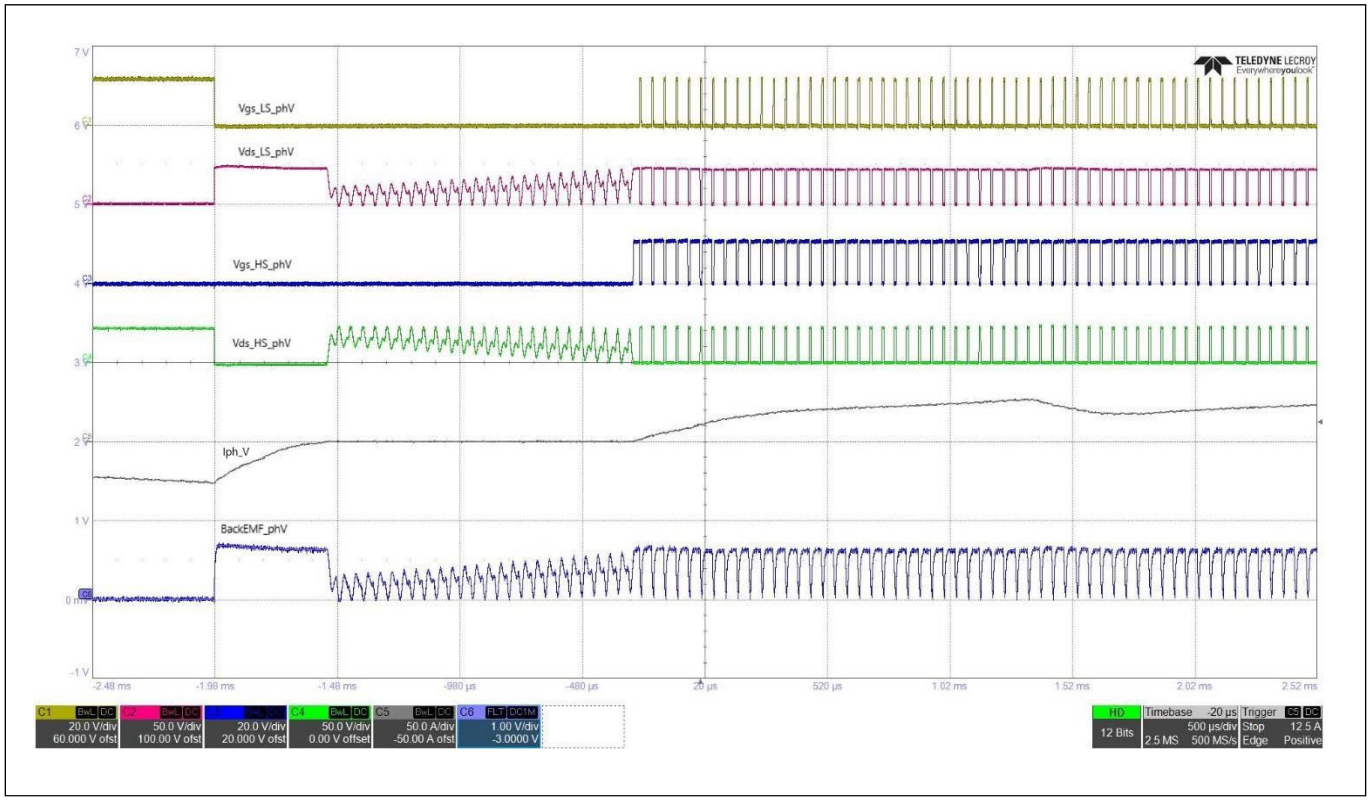

図 57　V相　波形　(500µs/div)
V_{GS_LS} (黄), V_{DS_LS} (赤), V_{GS_HS} (青), V_{DS_HS} (緑), I_{PHASE} (グレー), back EMF (青)

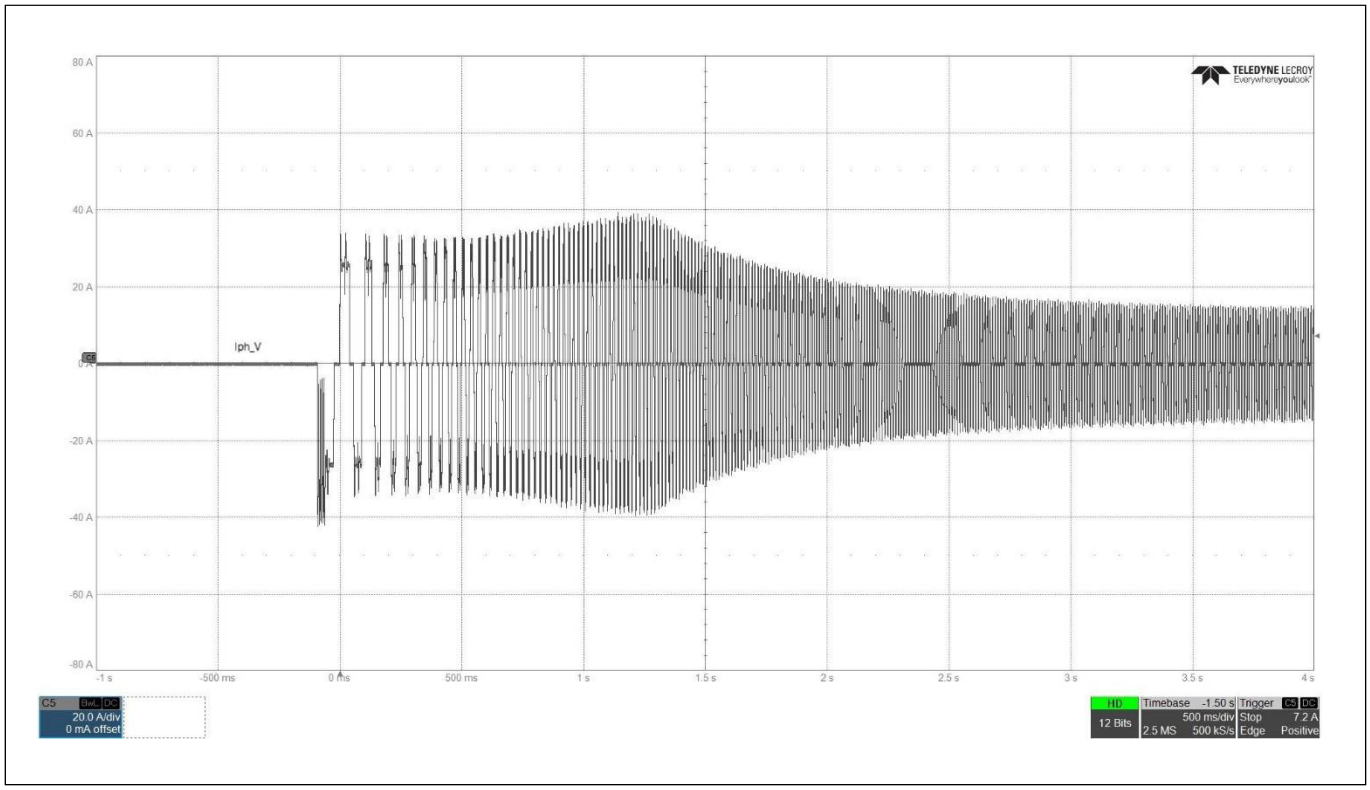

図 58　V相　スタート電流 (500ms/div)
I_{PHASE} (グレー)

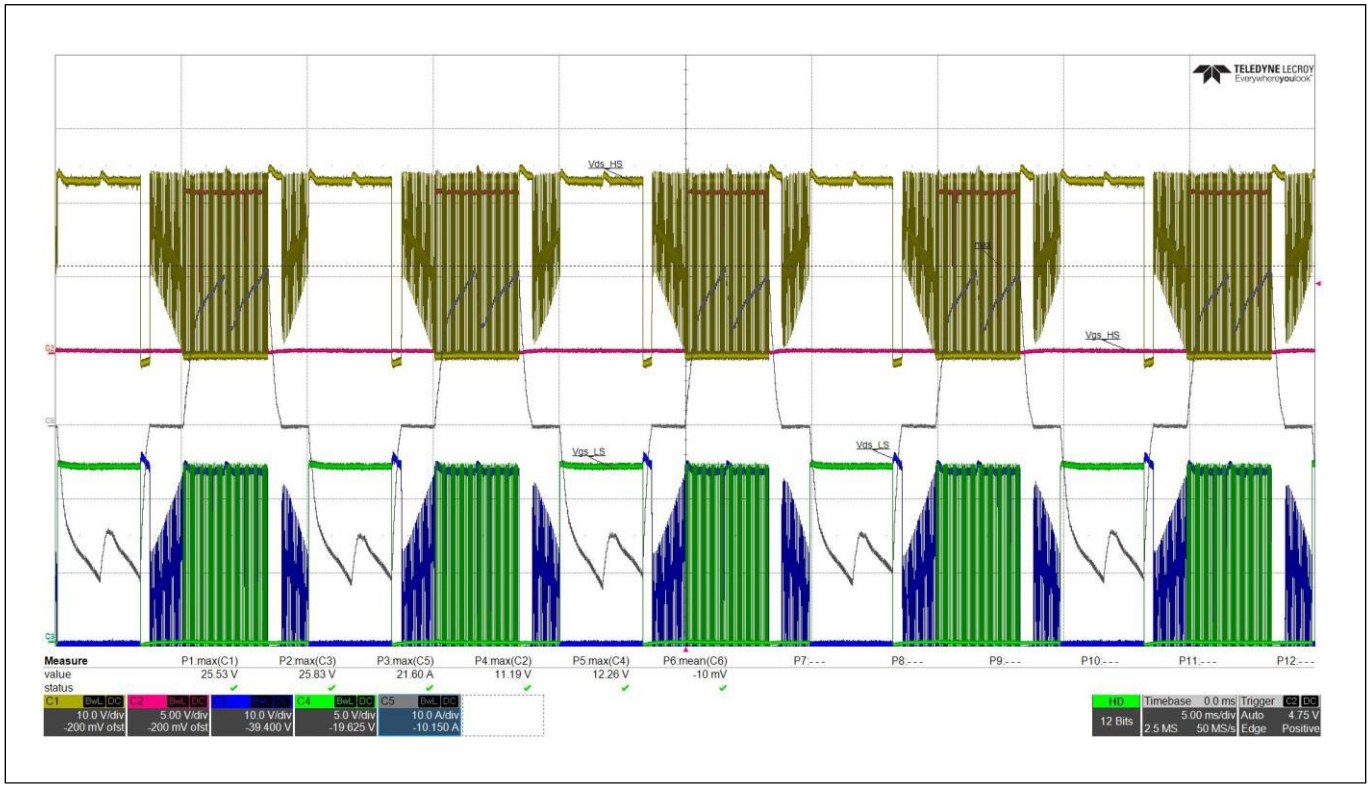

図 59　300 Wで 24 V 入力の場合の V 相波形 (5ms/div)
V_{GS_LS} (緑), V_{DS_LS} (青), V_{GS_HS} (赤), V_{DS_HS} (黄), I_{PHASE} (グレー)

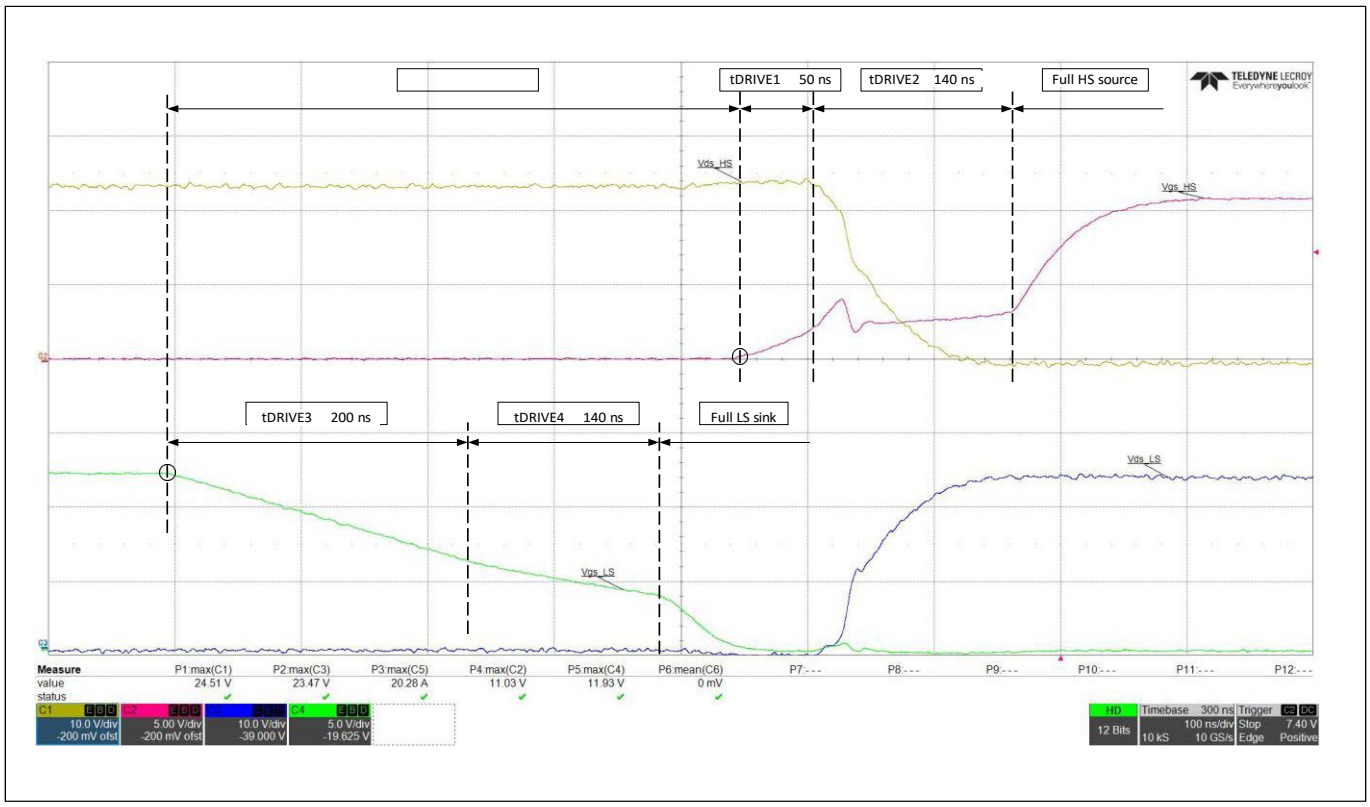

図 60　300 W で 24 V 入力時の「V」相ノードの正転移 (100 ns/div)
V_{GS_LS} (緑), V_{DS_LS} (青), V_{GS_HS} (赤), V_{DS_HS} (黄)

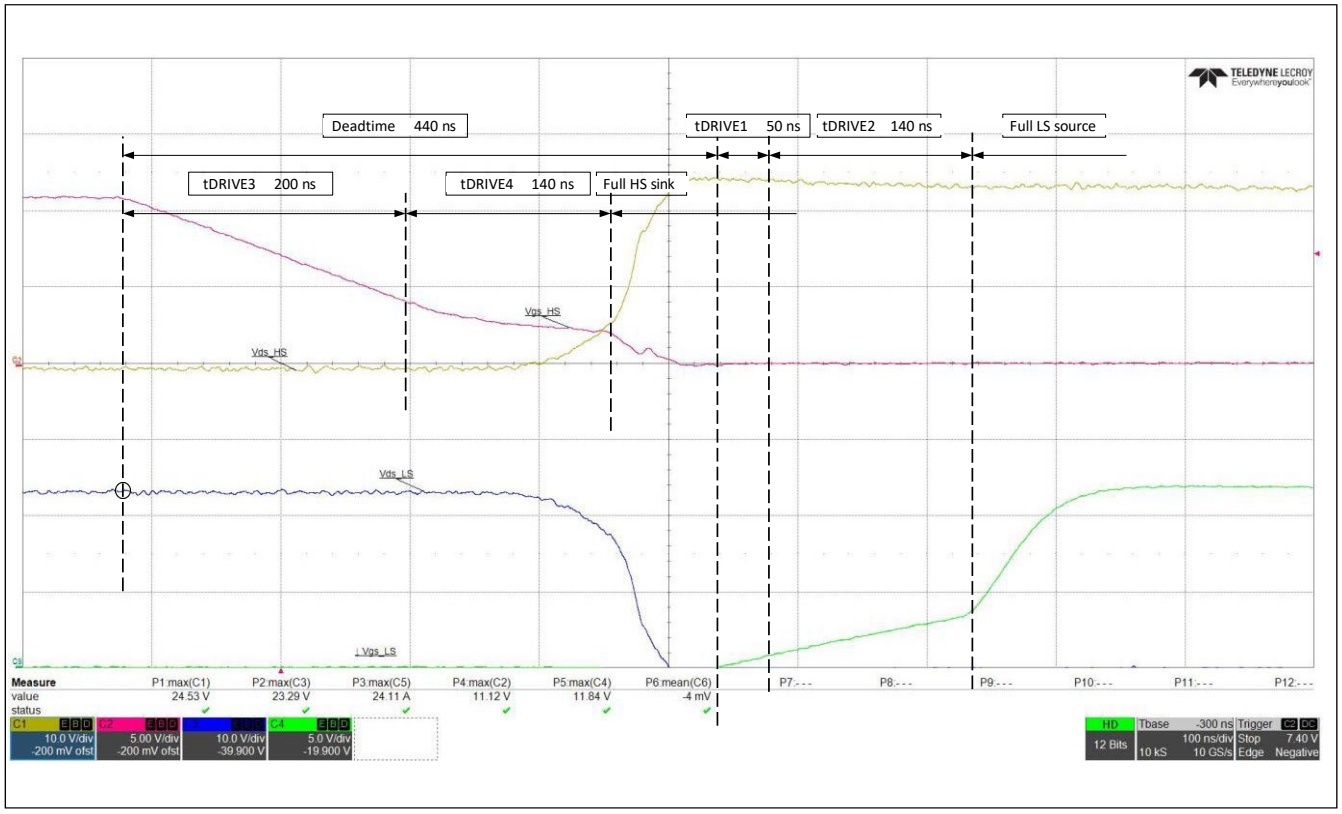

図 61　300 W で 24 V 入力時の「V」相ノードの負方向遷移 (100ns/div)
V_{GS_LS} (緑), V_{DS_LS} (青), V_{GS_HS} (赤), V_{DS_HS} (黄)

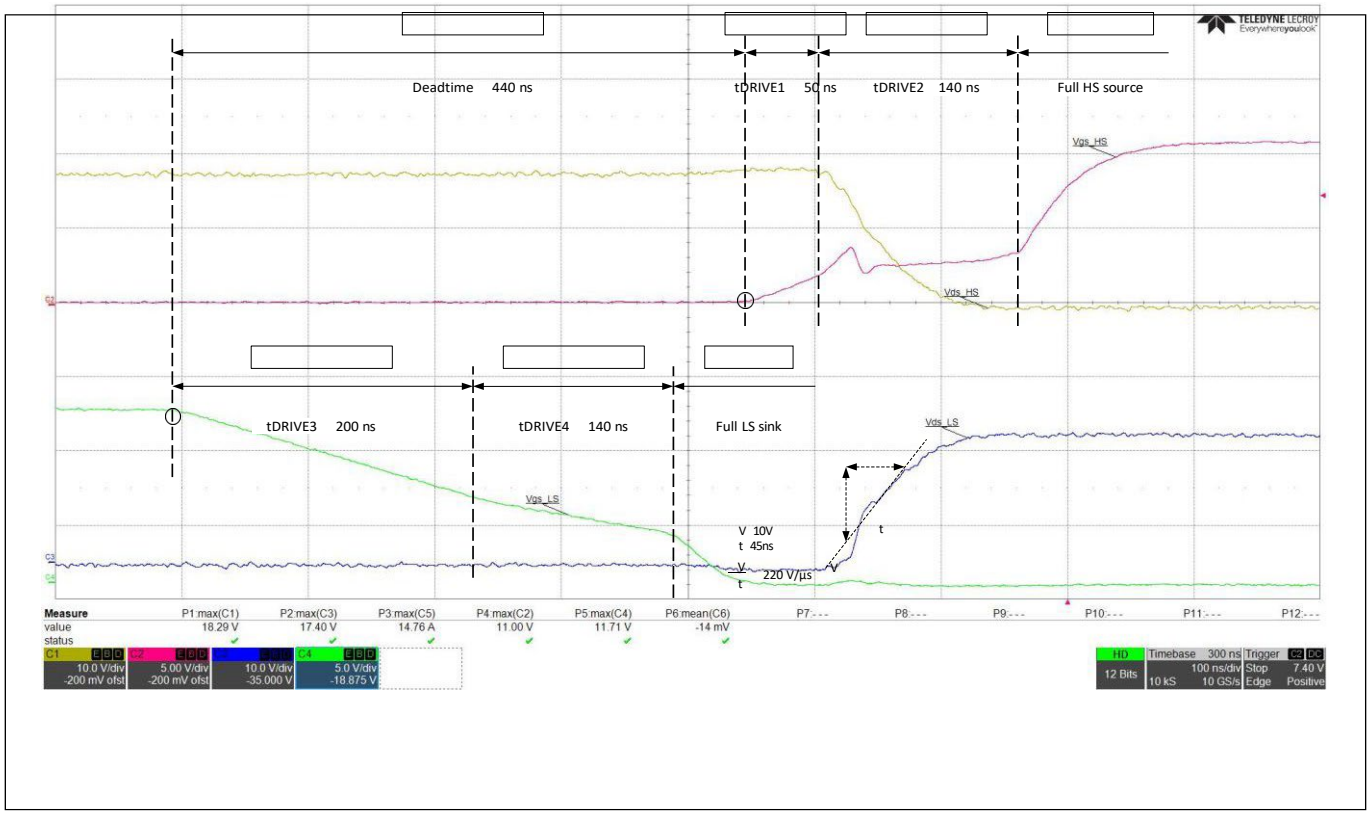

図 62　300 W で 18 V 入力時の「V」相ノードの正転移 (100 ns/div)
V_{GS_LS} (緑), V_{DS_LS} (青), V_{GS_HS} (赤), V_{DS_HS} (黄)

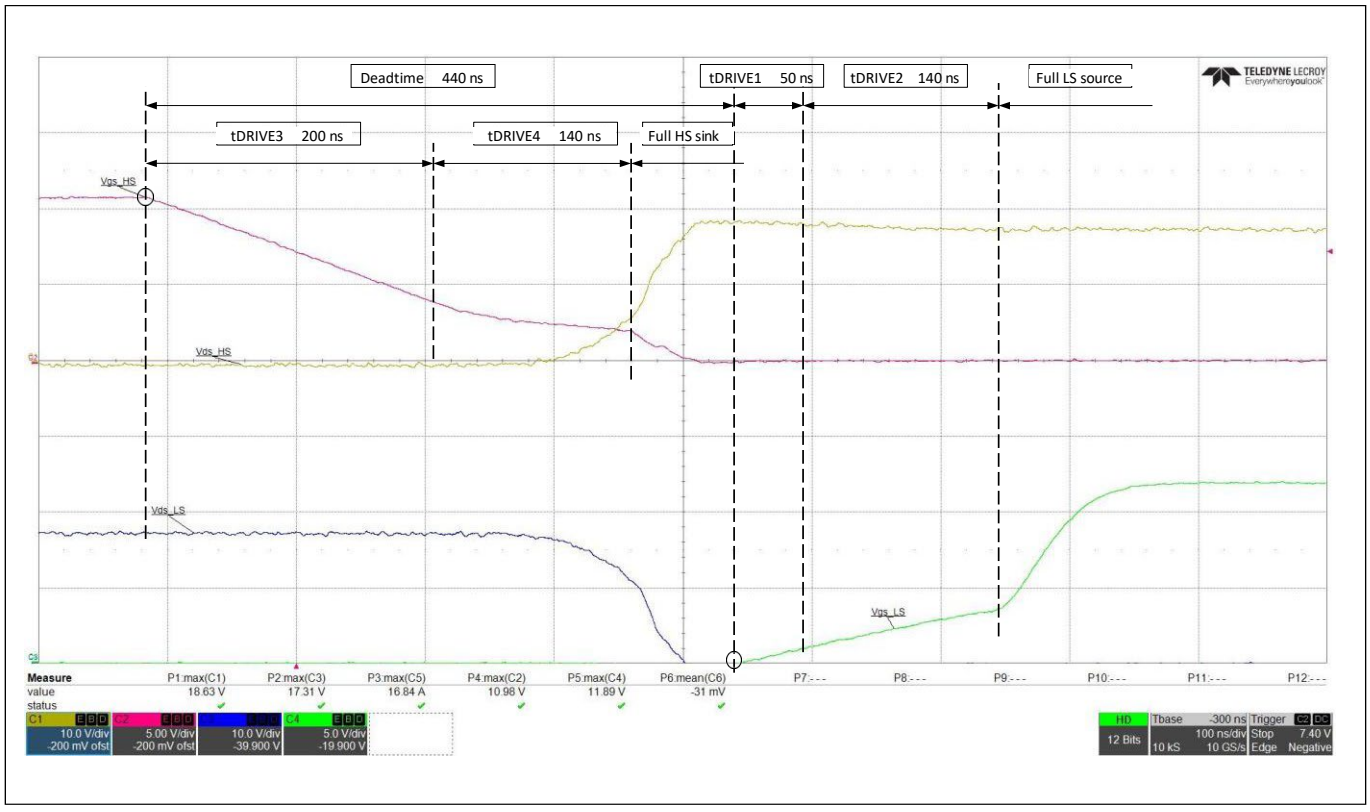

図 63　300 W で 18 V 入力時の「V」相ノード負転移 (100 ns/div)
V_{GS_LS} (緑), V_{DS_LS} (青), V_{GS_HS} (赤), V_{DS_HS} (黄)

10.1 電力測定

		Element 3	Element 4	Element 5	Element 6
Urms	[V]	18.021	7.319	7.287	7.314
Irms	[A]	17.886	15.522	15.670	15.499
P	[W]	0.3041 k	0.0908 k	0.0911 k	0.0913 k

図 64 公称入力電圧18 V、入力電力300 W時の入出力測定結果

上記の結果では、要素3がインバーターへの直流入力を表している。素子4、5、6はそれぞれ出力相のU、V、Wに接続されている。入力電力304.1 Wに対し、総出力電力は90.8 W＋91.1 W＋91.3 W＝273.2 Wに相当します。これにより、効率は273.2/304.1=89.8%、損失は30.9 Wとなります。
しかし、損失の一部は入出力ケーブルに起因するため、真のインバーター効率はこの値よりも高くなります。このことは、次章の部品温度上昇の測定値が非常に緩やかであることからも明らかです。

		Element 3	Element 4	Element 5	Element 6
Urms	[V]	24.018	9.689	9.607	9.817
Irms	[A]	24.669	22.218	22.319	22.134
P	[W]	0.5553 k	0.1637 k	0.1602 k	0.1657 k

図 65 公称入力電圧24 V、入力電力500 W時の入出力測定結果

入力電力555.3 Wに対し、総出力電力は163.7 W＋160.2 W＋165.7 W＝489.6 Wに相当します。これにより、効率は489.6/555.3=88.2%で、損失は65.7Wとなります。
この場合も、損失の一部は入出力ケーブルに起因するため、実際のインバーター効率は高くなります。次節の部品温度上昇測定でも、このことが示されています。

10.2 熱測定

熱画像は、部品温度が上昇し、定常状態に達するまでの15分間動作後に撮影しました。ヒートシンクや強制空冷は使用していません。

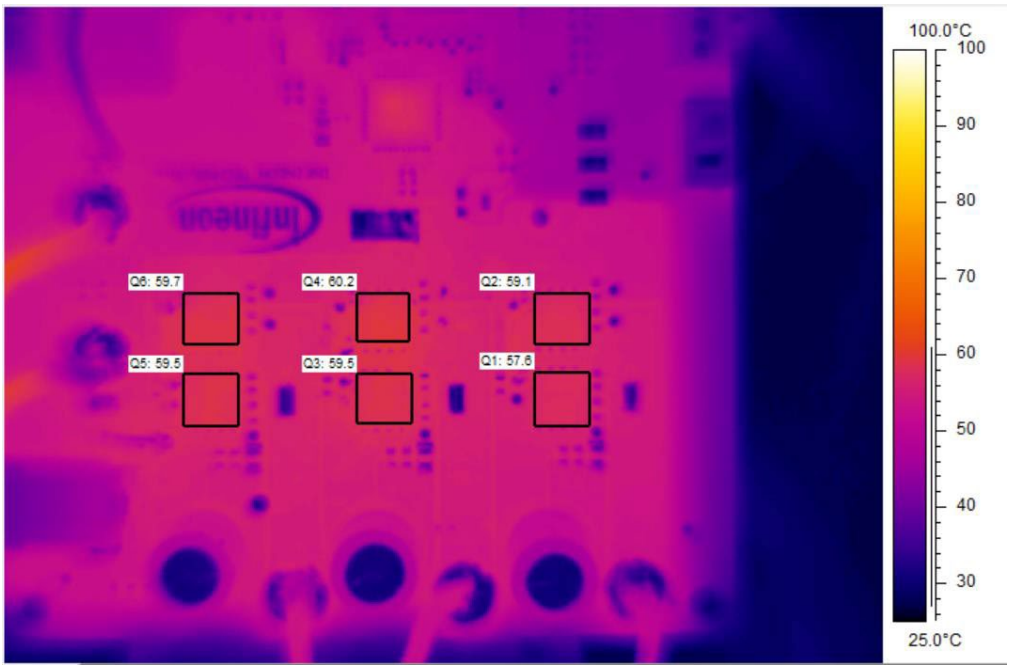

図 66　入力18 V、負荷300 Wでの熱測定結果

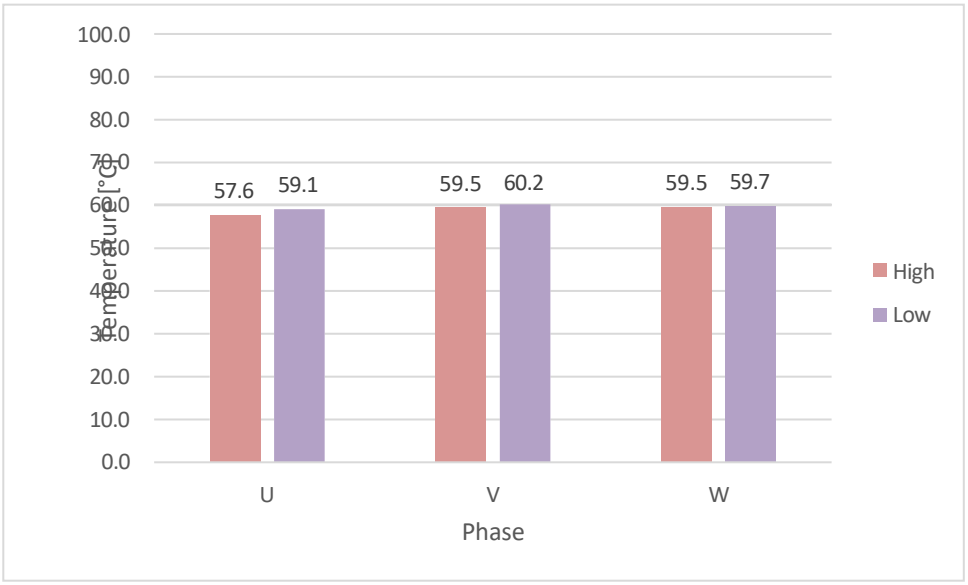

図 67　入力18 V、負荷300 Wの場合の熱測定概要

テスト結果

入力18 V、入力電力300 Wでの温度上昇は35°Cにとどまる。電圧を24 Vに上げ、負荷を増やして入力電力を500 Wまで上げたところ、次のような結果になりました。

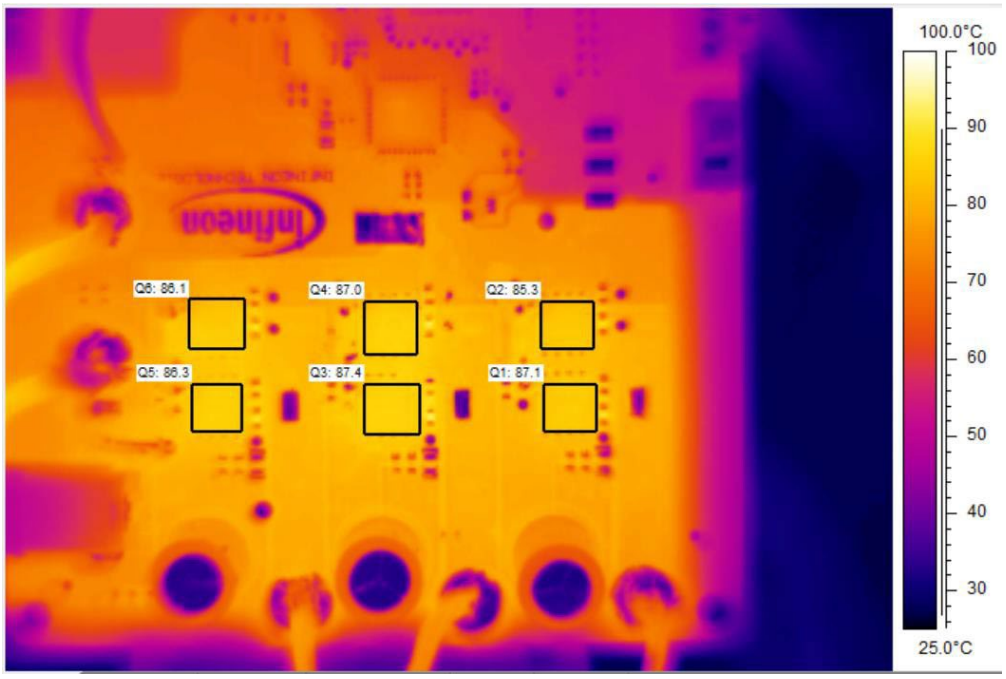

図 68　入力24V、負荷500Wでの熱測定結果

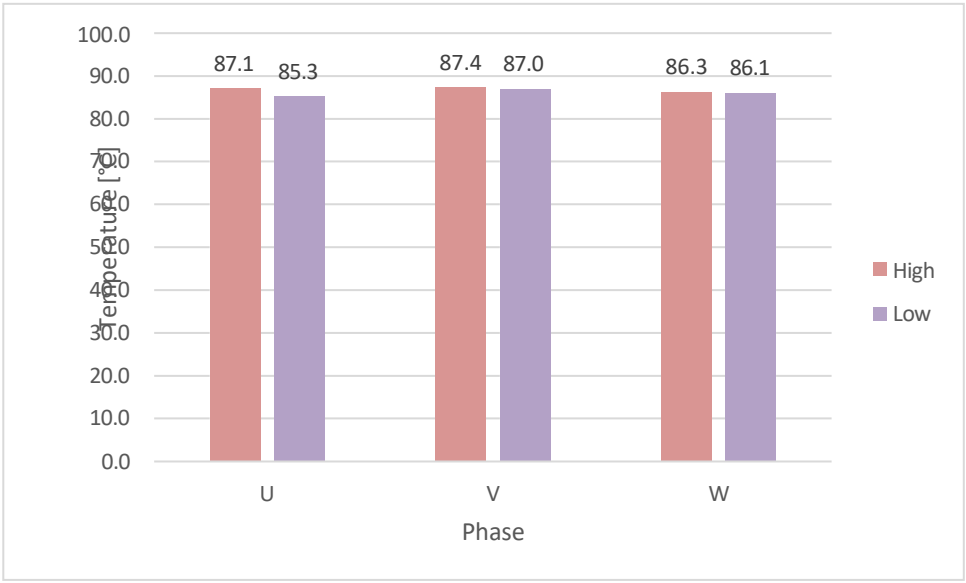

図 69　入力18V、負荷300Wでの熱測定概要

温度上昇は65°C以下で、いずれの場合もインバーターMOSFETのすべてのケース温度の差は無視できるほど小さいことがわかります。

11 おわりに

EVAL_6EDL71141_TRAP_1SH評価ボードは仕様を満たしており、6EDL7141の特長と汎用性が実証されています。動作原理、回路設計、制御方式、PCBレイアウトのすべてが説明されています。モーターの速度、方向、ブレーキは、ボード上のスイッチとポテンショメーターでローカルに制御することも、GUIツールで制御することも可能です。GUIツールの豊富な機能を説明しました。ゲート駆動パラメーターの計算方法を示し、その結果を試験波形で検証した。カスタマイズされたファームウェアとコンフィギュレーションパラメーターをシステムにインストールすることにより、設計プロセスを大幅に簡素化し、不要なコンポーネントを排除することで、製品開発の簡素化と市場投入までの時間の短縮を実現することができます。

ハイサイドで発生するハードスイッチされたdVds/dt波形の非線形性により、スイッチオンで位相ノードの正転が開始されることに留意してください。測定されたスルーレートは220 V/µsで、目標値である150 V/µsより高くなります。この計算では、非直線性だけでなく、ゲート電荷とゲート駆動電流の値の許容誤差が予想されるため、中程度の高い誤差が予想されます。これを考慮すると、6EDL7141 のコンフィギュラブル ゲート ドライブ出力の利点は明らかで、ゲート ドライブ抵抗やダイオードを一切使用せずにスイッチング性能を示すことができます。この設計例では、EMIとVDSスイッチオフ過渡現象を最小限に抑えるため、かなり遅いスルーレート (dVds/dt)が選ばれています。テスト波形はスイッチオフ過渡応答を示さないため、スイッチオフ時にMOSFETがアバランシェを起こすことなく、スルーレートをさらに上げることが可能です。また、ドレイン-ソース間スナバネットワークを削除することで、スイッチング損失をさらに低減し、効率を向上させることも可能です。

ローサイドのスイッチオンはごくわずかで、ハイサイドのスイッチオフ時に相電流がローサイドのMOSFETボディダイオードに整流されるため、相端子電圧がすでに過渡遷移した後に発生します。

三相インバーターBSC007B04LS6クラス最高のOptiMOS™ 6スイッチを5x6 PQFN SuperSO8 (TDSON-8 FL) パッケージに搭載し、入力電力500Wまでヒートシンクを取り付けることなく優れた性能を発揮することが熱測定から判明しました。基板下面にヒートシンクを取り付けることで、このドライバーの電力処理能力をさらに向上させることができます。

12 参考文献

[1] Infineon Technologies, **6EDL7141 datasheet**
[2] Infineon Technologies, Sensored trapezoidal control firmware design in EVAL_6EDL7141_TRAP_1SH
[3] Infineon Motor Handbook, Version: 2.1, Release date: December 3, 2019 Institute for Power Electronics and Electrical Drives, RWTH Aachen University: Fang Qi, Daniel Scharfenstein, Claude Weiss
Infineon Technologies AG: Dr. Clemens Müller, Dr. Ulrich Schwarzer
[4] Infineon Technologies, Application Note AN_1911_PL88_2001_203254, **Block commutation vs. FOC in power tool motor control**, V 1.0, November 2019
[5] Infineon Technologies, Application Note AP32359, **BLDC motor control software using XMC™**,
V 1.0, January 2017
[6] Infineon Technologies, Application Note ER_201612_PL16_04, **ME/MF Direct™ FET Kit, DEMO-PTOOL- 300W-M**, V 1.0, December 2016
[7] Faulhaber, Application Note 136, Block commutation with digital Hall sensors, Dr. Fritz Faulhaber & Co.
[8] Infineon Technologies, Application Note AP32359, BLDC motor control software using XMC™, V 1.0,
January 2017
[9] Infineon Technologies, Application Note AP32370, **PMSM FOC motor control software using XMC™**, V 1.5,
December 2018
[10] Infineon Technologies, White Paper, Power Loss and Optimized MOSFET Selection in BLDC Motor Inverter Designs – Understanding MOSFET power losses in block (trapezoidal) commutation, April 2016
[11] Infineon Technologies and RWTH Aachen University, Motor Handbook, Version 2.1, March 2019
[12] Wei-Feng Zhang and Yue-Hui Yu, Comparison of Three SVPWM Strategies, Journal of Electronic Science and Technology of China, Vol. 5, No. 3, September 2007

Revision history

Document version	Date of release	Description of changes
V 1.0	June 11, 2021	First release
V 1.1	November 15, 2021	Updated: Figure 1, Table 4, Figure 37 and added figure 54. Text updated section 4.2.1.3. Added firmware documentation reference [2].

Trademarks
All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.

Edition 2021-11-15
Published by
Infineon Technologies AG
81726 Munich, Germany

© 2021 Infineon Technologies AG. All Rights Reserved.

Do you have a question about this document?
Email: erratum@infineon.com

Document reference
AN_2104_PL88_2104_024859

IMPORTANT NOTICE
The information contained in this application note is given as a hint for the implementation of the product only and shall in no event be regarded as a description or warranty of a certain functionality, condition or quality of the product. Before implementation of the product, the recipient of this application note must verify any function and other technical information given herein in the real application. Infineon Technologies hereby disclaims any and all warranties and liabilities of any kind (including without limitation warranties of non-infringement of intellectual property rights of any third party) with respect to any and all information given in this application note.

The data contained in this document is exclusively intended for technically trained staff. It is the responsibility of customer's technical departments to evaluate the suitability of the product for the intended application and the completeness of the product information given in this document with respect to such application.

For further information on the product, technology, delivery terms and conditions and prices please contact your nearest Infineon Technologies office (**www.infineon.com**).

WARNINGS
Due to technical requirements products may contain dangerous substances. For information on the types in question please contact your nearest Infineon Technologies office.

Except as otherwise explicitly approved by Infineon Technologies in a written document signed by authorized representatives of Infineon Technologies, Infineon Technologies' products may not be used in any applications where a failure of the product or any consequences of the use thereof can reasonably be expected to result in personal injury.