

## Embedded Code Generation *DEMO MODEL*

### Multiphase Buck Converter

多相降圧コンバータ

- Use the high resolution timer (HRTIM) to generate advanced PWM signals for a three-phase interleaved buck converter with phase-shedding -
- 位相シェディングを備えた三相インターリーブ降圧コンバータ用の高度なPWM信号を生成するために、高分解能タイマ(HRTIM)を使用します -

Last updated in STM32 TSP 1.4

## 1 はじめに

このSTM32デモモデルは、STMicroelectronics社のアプリケーションノートAN4539[1]に記載されているインターリーブ降圧コンバータを搭載しています。

電源回路は、共通の負荷に電力を供給する三相インターリーブ降圧コンバータで構成しています。位相シェディングとも呼ばれる、インターリーブされた位相数を動的に変更することで、軽負荷時のコンバータ効率を向上させることができます。さらに、多相降圧トポロジは、出力キャパシタの電流リップルを低減できるという利点があります。

以降ではモデルの簡単な説明と、シミュレーション方法、および制御コードをSTM32ターゲットにデプロイする方法について説明します。

**注意** このモデルには、以下の方法でアクセスできるモデル初期化コマンドが含まれています:

*PLECS Standalone*: シミュレーションメニュー -> シミュレーション・パラメータ... -> 初期化

*PLECS Blockset*: **Simulink**モデルウィンドウで右クリック -> モデル プロパティ -> コールバック -> InitFcn\*

## 2 要求仕様

このデモモデルを実行するには、次の製品が必要です(www.plexim.comから入手可能):

- バージョン4.6.7以降のPLECS [Blockset](#)または[Standalone](#)
- [PLECS Coder](#)ライセンス
- バージョン1.3.1以降の[STM32 Target Support Package](#)
- [RT Box Target Support Package](#)
- [PLECS RT Box](#) 1台
- [RT Box NUCLEO Interfaceボード](#) 1枚
- [NUCLEO-G474RE STM32 Nucleoボード](#) 1枚

Plantモデルは、RT Boxのすべてのバージョンで実行できます。Controllerは、NUCLEO-G474RE Nucleoボード上で実行できます。

**注意** このモデルには、以下の方法でアクセスできるモデル初期化コマンドが含まれています:

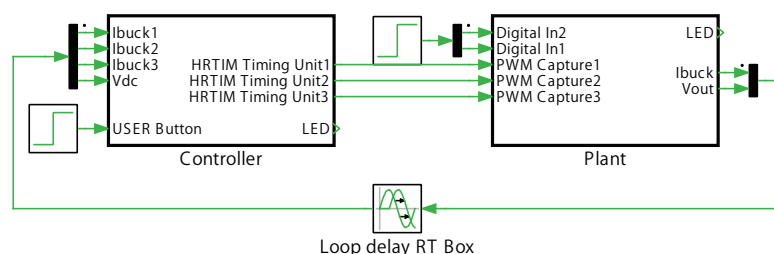
*PLECS Standalone*: シミュレーションメニュー -> シミュレーション・パラメータ... -> 初期化

*PLECS Blockset*: **Simulink**モデルウィンドウで右クリック -> モデル プロパティ -> コールバック -> InitFcn\*

## 3 モデル

最上位の回路図には、[図1](#)に示すように、電源回路とコントローラが含まれています。どちらのサブシステムも、**サブシステム** -> **実行の設定...**コンテキストメニューからコード生成が有効になっています。この手順は、PLECS Coderからサブシステムのモデルコードを生成するために必要です。

図1: デモモデルのトップレベルの回路図



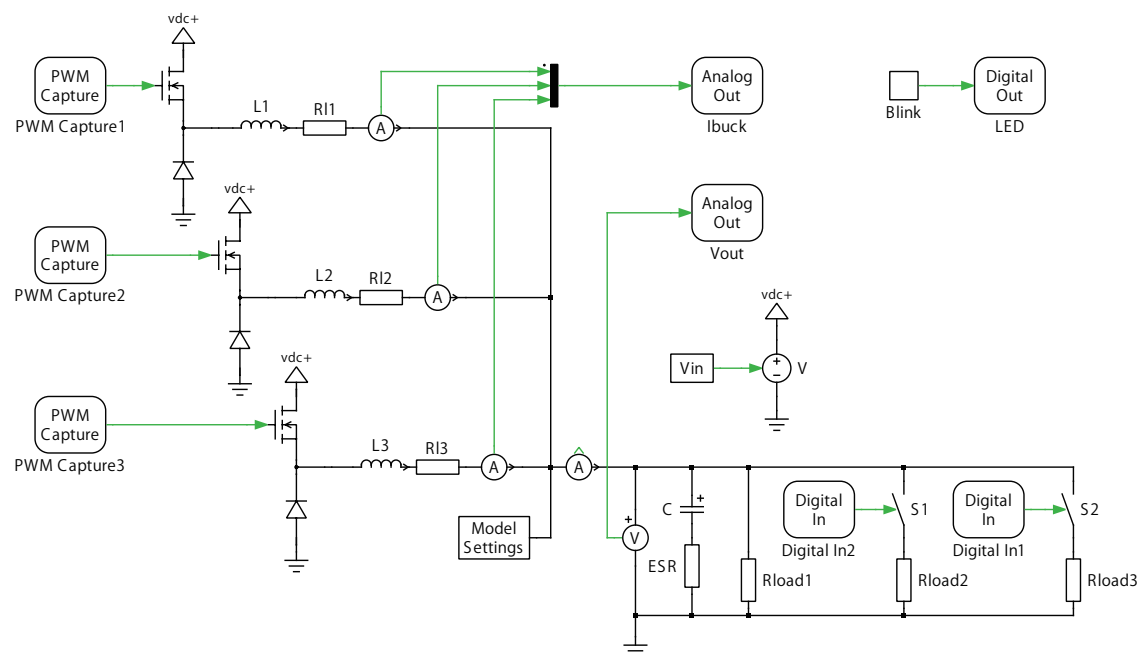
### 3.1 Plant

図2に示すように、電力回路は三相インターリーブ降圧コンバータを備えています。DC-DCコンバータには、 $V_{in} = 48V$ のDC電源電圧が供給されます。

3つのパルス幅変調(PWM)スイッチング信号は、PLECS RT BoxライブラリのPWM Captureブロックで取得します。パワーモジュールの構成要素とPWM信号のサブサイクル平均化に関する詳細は[2]に記載されています。三相電流と出力電圧は、PLECS RT BoxライブラリのAnalog Outブロックに接続されています。各相の位相インダクタンスおよびそれに対応する直列抵抗は、それぞれの公称値に対して±10%の誤差があります。これにより、各相間の電流が不平衡になります。適切なコントロール構造を用いることにより、アクティブな降圧コンバータ間の均等な電流分担を確保する必要があります。

プラントサブシステムの離散化ステップサイズは $2\mu s$ に設定されています。

図2: 多相降圧コンバータの電源回路



2つのDigital In信号の位置に基づいて全体の負荷抵抗を変更できます。アクティブな相数は、総負荷電流の関数です。負荷抵抗が低いほど、より多くの相がアクティブになります。

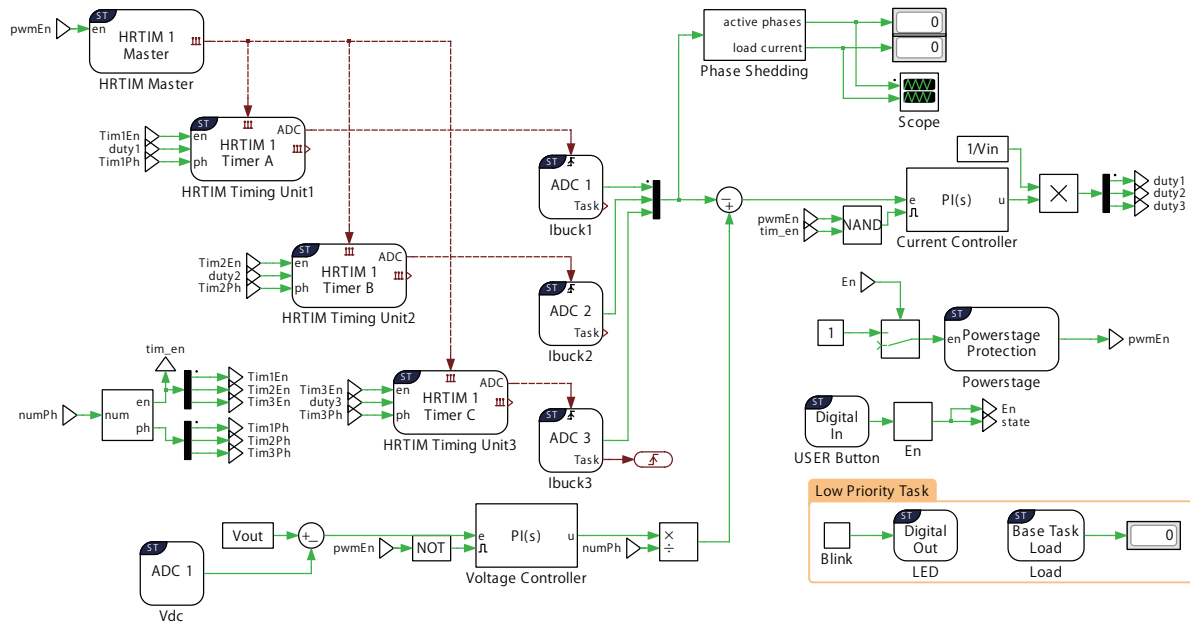
### 3.2 Controller

図3に示すControllerサブシステムでは、STM32 TargetコンポーネントライブラリのAnalog In (Triggered)ブロックによって各相電流を測定します。これらはインジェクト変換を表し、サンプリングポイントは各PWM相のオン時間の中央に配置されます。これにより、リップルをほぼ完全に排除した位相電流のサンプリングが保証されます。変換開始トリガは、3つのHRTIM Timing Unitブロックによって出力されます。

DC出力電圧は、通常のAnalog Inブロックによってサンプリングされます。

3つのHRTIM Timing Unitは、HRTIM Masterブロックに同期されます。この構成により、位相シフトされたPWM信号を生成できます。位相シフトはマスタのタイマによって処理されます。印加される相対位相シフト $\theta_{ph}$ は、アクティブな位相数

図3: Controllerサブシステム



に応じて変化し、次のように表されます:

$$\Theta_{ph} = \frac{360^\circ}{N_{ph}} \quad (1)$$

マスタのタイマは連続モードで動作し、同期されたタイミングユニットを定期的のリセットします。タイミングユニット用の3つのリセット信号は、マスタのタイマの3つの内部比較レジスタによって生成されます。各比較レジスタの値が計算され、要求された位相シフトが生成されます。しかし、デューティ比は3つのタイミングユニットそれぞれによって個別に処理されます。

これは図4にも示されています。さらに、サンプリングポイントには色を付けて示しています。のこぎり波キャリアの場合、サンプリングポイントのタイミングはデューティ比が変化するたびに調整する必要があります。三相目では、結果として生じるインダクタ電流を図に示します。図に示すように、サンプリング点は平均電流を表しています。

アクティブな相数は、総負荷電流に基づいて計算されます。総負荷電流は、アクティブな相の個々の電流の合計として推定します。ループ遅延が小さいため、サンプリングポイントはPWM信号のオン時間の中央に位置しなくなります。これは、誤った平均電流値につながります。推定されるサンプリング誤差はソフトウェアによって補正されます。以下の式は補正を表しています:

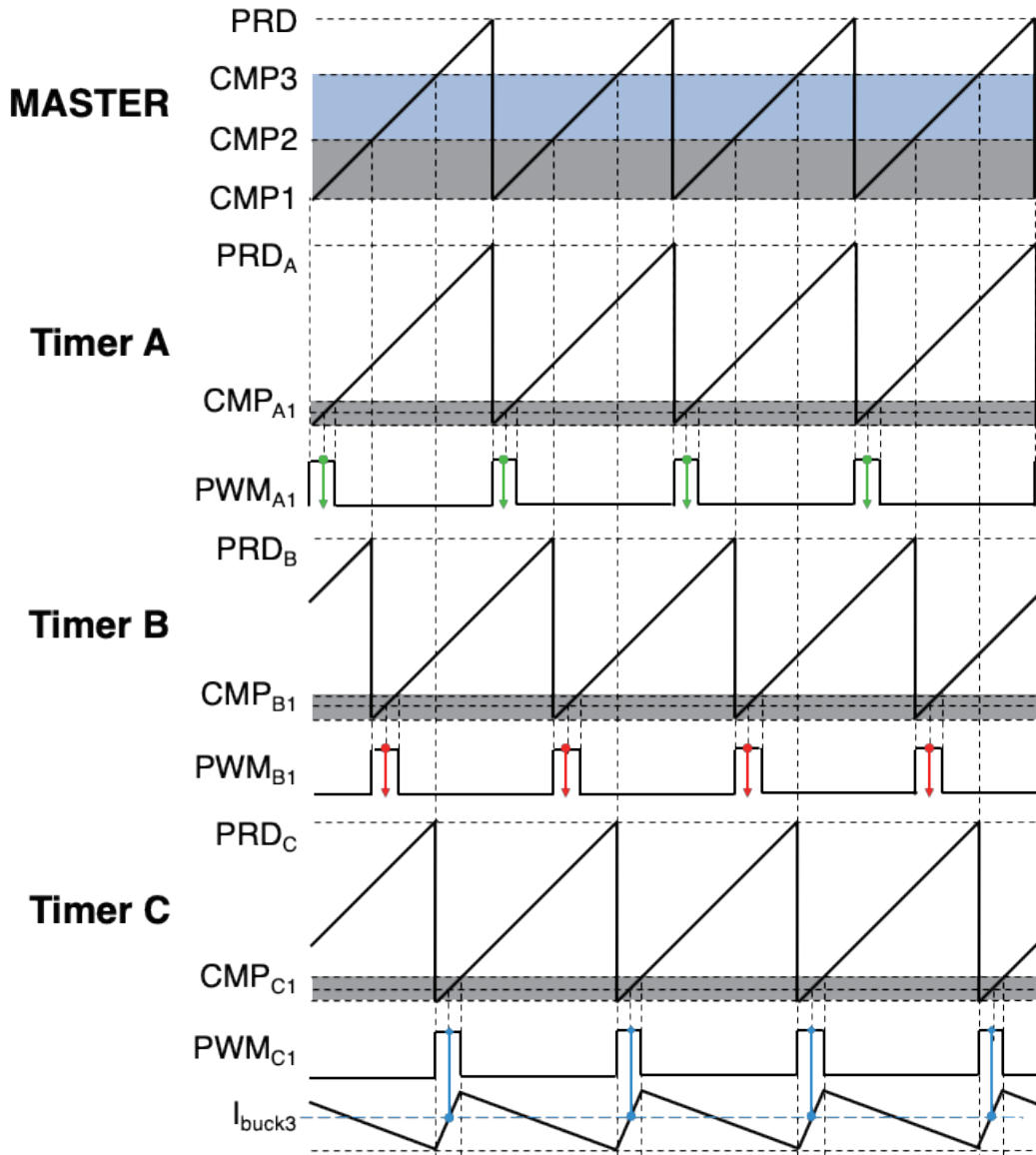
$$i_x^* = \begin{cases} i_x + \frac{V_{in} - V_{out}}{L} T_{delay} & \text{for } T_{delay} \leq \frac{T_{on}}{2} \\ i_x + \frac{V_{in} - V_{out}}{L} \frac{T_{on}}{2} - \frac{V_{out}}{L} (T_{delay} - \frac{T_{on}}{2}) & \text{for } T_{delay} > \frac{T_{on}}{2} \end{cases} \quad (2)$$

$i_x^*$ は補正された相電流を表し、 $i_x$ はサンプリングされた相電流を表します。 $V_{in}$ と $V_{out}$ はコンバータの入力電圧と出力電圧であり、 $L$ は公称位相インダクタ値を表します。 $T_{delay}$ は測定されたループ遅延であり、 $T_{on}$ はPWMオン時間の持続時間(秒)です。

アクティブな相数は、負荷電流に応じて動的に調整されます。アクティブな相数が変化するたびに、残りの相の位相シフトを再調整する必要があります。

コンバータは、入れ子構造の電圧制御ループと電流制御ループによって制御されます。単一の外側電圧ループにより、負荷電圧の厳密な制御が保証されます。電圧コントローラは、3つの内側電流制御ループの電流設定値を提供します。各

図4: アクティブな3つの相に対してインターリーブ方式のPWM生成を行います。色が付いているのは、3つの相のサンプリングポイントを示しています。



インターリーブ相にはそれぞれ独自の電流コントローラが備わっています。個別の電流制御ループにより、アクティブな相間で電流が均等に分配されることが保証されます。電流制御ループは、0と1の比較値をHRTIM Timing Unitに供給します。プロセッサのリソース使用量の概算値は、STM32コンポーネントライブラリのBase Task Loadブロックから取得できます。この値は、Coderオプションで設定された離散化ステップサイズに対する基本タスクの所要時間をパーセントで表したものです。

点滅するLED(LD2)は、MCU上でファームウェアが動作していることを示します。

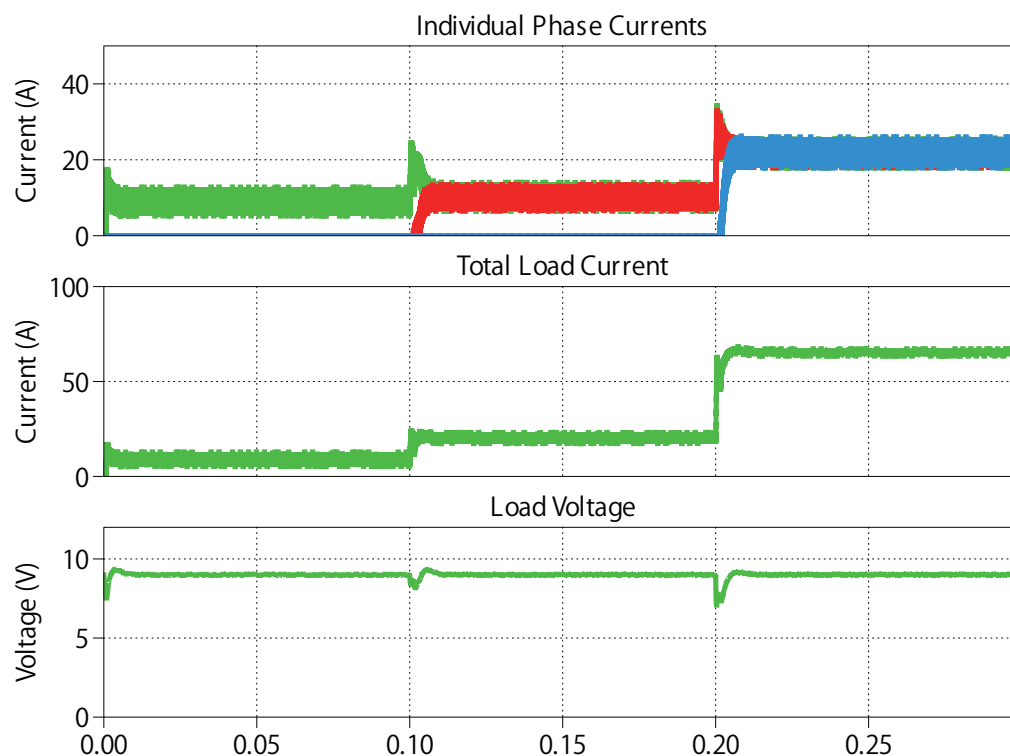
## 4 シミュレーション

### 4.1 オフラインシミュレーション

オフラインシミュレーションの結果を確認するには、シミュレーション -> 開始から添付のモデルを実行してください。図5は、"Plant"サブシステムのPLECSスコープの結果を示しています。

0.001秒でUSERボタンが押され、コントローラが有効になります。まず、比較的軽い負荷条件のみをシミュレーションします。したがって、アクティブな相は1つだけです。0.1秒の時点で負荷が増加します。これにより、2つ目の降圧コンバータが作動します。最後に、0.2秒の時点で負荷が再び増加します。この動作点では、3つのコンバータはすべて並列に動作し、総負荷電流に均等に分担します。

図5: 負荷増加ステップのオフラインシミュレーション結果



## 4.2 STM32ターゲットの構成

このデモモデルのシミュレーションをコンピュータ上でオフラインモードで実行することに加え、"Controller"サブシステムをSTM32G474RE NUCLEOボード向けのターゲット固有のコードに直接変換することもできます。

以下の手順に従って、"Controller"サブシステムをSTM32 MCUにアップロードします。

- MCUをUSBケーブルでホストコンピュータに接続します。
- **Coder** -> **Coderオプション...**ウィンドウの**システム**リストから"Controller"を選択します。
- 次に、**ターゲット**タブからドロップダウンメニューでSTM32G4xを選択します。そして、**General**サブタブで、G474REを選択します。
- PLECSからMCUターゲットを直接デプロイするには、**Generate code only**パラメータのチェックを外し、ドロップダウンメニューから目的の**Programming interface**を選択します。デフォルトのプログラミングインタフェースはOpenOCDです。
- **ビルド**をクリックします。

正しくプログラムされていれば、NUCLEOボード上の緑色のLED "LD2"が点滅するはずです。

**注意** NUCLEOボード上のジャンパ構成を確認してください: JP5は未実装、JP8は位置[2-3]、JP6は閉じているはずです。

### 4.3 PLECS RT Boxの構成

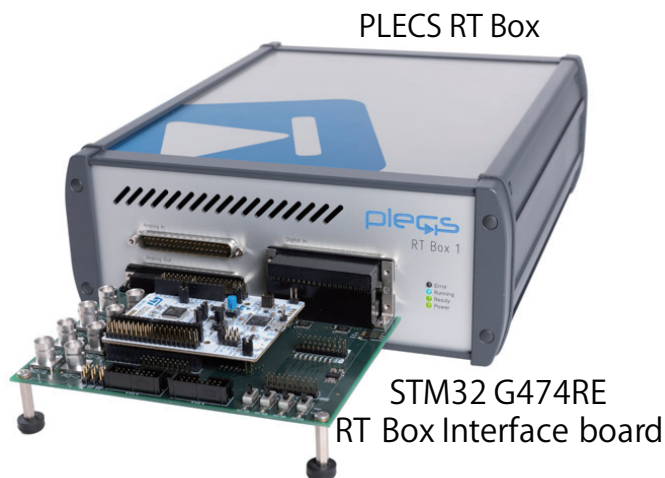
プログラムされたMCUで実際のパワーステージを制御する前に、PLECS RT Boxを使用してコントローラの動作を確認し、HILテストを実行することを強くお勧めします。図6に一般的なハードウェア構成を示します。NUCLEOボード(水色のボード)は、RT Box NUCLEO Interfaceボード(緑色のボード)を介してRT Boxに接続されています。

RT Box上でリアルタイムモデルを実行するには、以下の手順に従ってください。"Plant"サブシステムは、すべてのRT Boxプラットフォームで実行可能です。

- **Coder** -> **Coderオプション...**ウィンドウの**システム**リストから"Plant"を選択します。**ターゲット**タブで、ターゲットデバイスを選択します。そして**ビルド**をクリックして、モデルをターゲットのRT Boxにデプロイします。
- モデルをアップロードしたら、**Coderオプション**ウィンドウの**外部モード**タブから**接続**を選択し、**自動トリガを有効化**にチェックして、テスト結果をリアルタイムで確認します。

正しくプログラムされていれば、RT Box NUCLEO Interfaceボードの"DO-31"に対応するLEDが点滅するはずです。

図6: HIL検証のためのハードウェアセットアップ



### 4.4 閉ループHILテストの実行

NUCLEOボード上の青色の"User" ボタンを押して、MCUを有効にしてください。これにより、起動シーケンスとPWM信号の生成を開始します。"Plant"サブシステムのPLECSスコープで、リアルタイムの波形を観察します。

RT Box LaunchPad Interfaceボード上のスイッチ"DI-28"と"DI-29"をLowからHighに切り替えると、コンバータの負荷が増加します。

MCU上で計算された中間値を確認するには、以下の手順に従ってSTM32 MCUの外部モードに接続してください。

- 最初に、PLECS RT Boxの**外部モード**から"Plant"サブシステムを切断します(接続している場合)。
- **Coder** -> **Coderオプション...**ウィンドウの左側にある**システム**リストから"Controller"を選択します。
- 次に、**外部モード**タブから適切なターゲットデバイスを選択し、**接続**をクリックします。
- そして、**自動トリガを有効化**にチェックして、"Controller"サブシステムのPLECSスコープでテスト結果を確認します。

次に、4.3に記載されている手順に従って、RT Boxの外部モードに再度接続します。

多相コンバータの操作を停止するには、NUCLEOボード上の青色の"User"ボタンをもう一度押します。これによりPWM信号の生成が停止し、コントローラはアイドル状態に入り、"User"ボタンが次に押されるのを待ちます。

## 5 まとめ

このモデルは、HRTIM MasterブロックとHRTIM Timing Unitブロックを使用して、電力平均分配機能を備えた多相降圧コンバータ用のPWM信号を生成する方法を示しました。このモデルは、オフラインモードとリアルタイムモードの両方で実行できます。

## 6 参考文献

- [1] AN4539, HRTIM cookbook, 2020, Chapter: 7
- [2] J. Allmeling, and N. Felderer, “Sub cycle average models with integrated diodes for real-time simulation of power converters,” IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC), 2017.

改訂履歴:

STM32 TSP 1.3

初版

STM32 TSP 1.4

モデルの微調整

 Pleximへの連絡方法:

☎ +41 44 533 51 00 Phone

✉ Plexim GmbH Mail

Technoparkstrasse 1

8005 Zurich

Switzerland

@ info@plexim.com Email

<https://www.plexim.com> Web

Advancing Automation  
 アドバンオートメーションへの連絡方法:

☎ +81 3 5282 7047 Phone

✉ ADVAN AUTOMATION CO.,LTD Mail

1-9-5 Uchikanda, Chiyoda-ku

Tokyo, 101-0047

Japan

@ info-advan@adv-auto.co.jp Email

<https://adv-auto.co.jp/> Web

*Embedded Code Generation Demo Model*

© 2002–2026 by Plexim GmbH

このマニュアルで説明されているソフトウェアPLECSは、ライセンス契約に基づいて提供されています。ソフトウェアは、ライセンス契約の条件の下でのみ使用またはコピーできます。Plexim GmbHの書面による事前の同意なしに、このマニュアルのいかなる部分も、いかなる形式でもコピーまたは複製することはできません。

PLECSはPlexim GmbHの登録商標です。MATLAB、Simulink、およびSimulink Coderは、The MathWorks, Inc.の登録商標です。その他の製品名またはブランド名は、それぞれの所有者の商標または登録商標です。

本マニュアルは、Plexim社の英文マニュアルを日本語に翻訳したものです。本マニュアルと英文マニュアルとで差異がある場合、英文マニュアルを正とします。

本マニュアルの内容に基づいて発生した負傷や損害などに対して、Plexim GmbHおよびアドバン オートメーション株式会社は一切責任を負いません。製品とアプリケーションに関連したリスクを最小限に抑えるため、ユーザが適切な設計および保護対策を用意する必要があります。