

## Application Examples

### Efficient Microcontroller Peripheral Modeling with PLECS®

Mr. Munadir Ahmed

PLECS®による効率的なマイクロコントローラペリフェラルのモデリング

Version: 07-14

# 1 はじめに

PLECSなどの回路シミュレータを用いてシステムレベルの電力制御をモデリングする場合、通常はアルゴリズムのモデリングに重点が置かれますが、シミュレーション全体の効率と速度を向上させるためマイクロコントローラユニット(Micro Controller Unit: MCU)ペリフェラルモデルは理想化されることがよくあります。実際、アナログ-デジタル(ADC)ペリフェラルモジュールは単純なサンプルアンドホールドブロックとしてモデリングされ、基本的なパルス発生器はパルス幅変調(PWM)波形を生成します。これらの簡略化モデルと、実際のペリフェラルモジュールの機能を比較すると、固有の制限があります。システムモデルの忠実性が低いと、電力制御に重要な効果が失われ、シミュレーションが不正確になる可能性があります。さらに、基本的なペリフェラルモデルによって提供される制限された機能は、高度な変調およびサンプリング技術をモデリングするには不十分な場合があります。

たとえば、一般的なPWMモジュールは、さまざまなイベントでADCモジュールの変換開始(start of conversion: SOC)をトリガする柔軟性を提供します。高電流や高電圧リップルのシステムでも、エンジニアはPWM波形の任意の過程でADC入力をサンプリングできるようになります。実際のシステムと同様、PWMモジュールとADCモジュールの両方で割り込みをトリガを制御できます。さらに、精密ペリフェラルモデル(high fidelity peripheral models: HFPM)を使用すると、エンジニアはPWMおよびADC構成がシステム全体に及ぼす影響を検証できます。したがって、MCUが提供する複雑な機能をより正確に反映し、高度な制御戦略の実装を容易にするために、詳細なペリフェラルモデルの活用が必要です。ただし、このようなペリフェラルモデルは、シミュレーション時間への影響を最小限に抑えるため、最も効率的な方法で実装することが重要となります。

## 2 PLECSによる効率的なペリフェラルのモデリング

パワーエレクトロニクスシステムのシミュレーションには、大きく分けて2種類のソルバが利用できます。固定ステップソルバは、モデリングしたシステムをユーザが指定したステップサイズに離散化します。ソルバには、システムの精度要件を満たすためにシミュレーション中にステップサイズを変更する機能はありません。PWMモジュールをモデリングする場合、デューティ比、周期、デッドタイムの影響を正確に捉えるのに十分な分解能を持つようなステップサイズを選択する必要があります。これにより、ステップサイズはカウンタ周期によって定義され(たとえば、100MHzでクロックされるペリフェラルの場合は10ns)、非常に非効率的なシミュレーションになります。シミュレーション効率を高めるには、ステップサイズをカウンタ周期の倍数に増やす必要がありますが、利用可能なPWM分解能が犠牲になります。2つめのソルバは、シミュレーション中にステップサイズを変更できる可変ステップソルバです。この動的な性質により、PWMモジュールのモデリングをより効率的に行うことができます。これにより、固定ステップと比較して、ユーザは強化された機能を持つPWMモジュールを非常に効率的にモデリングできます。

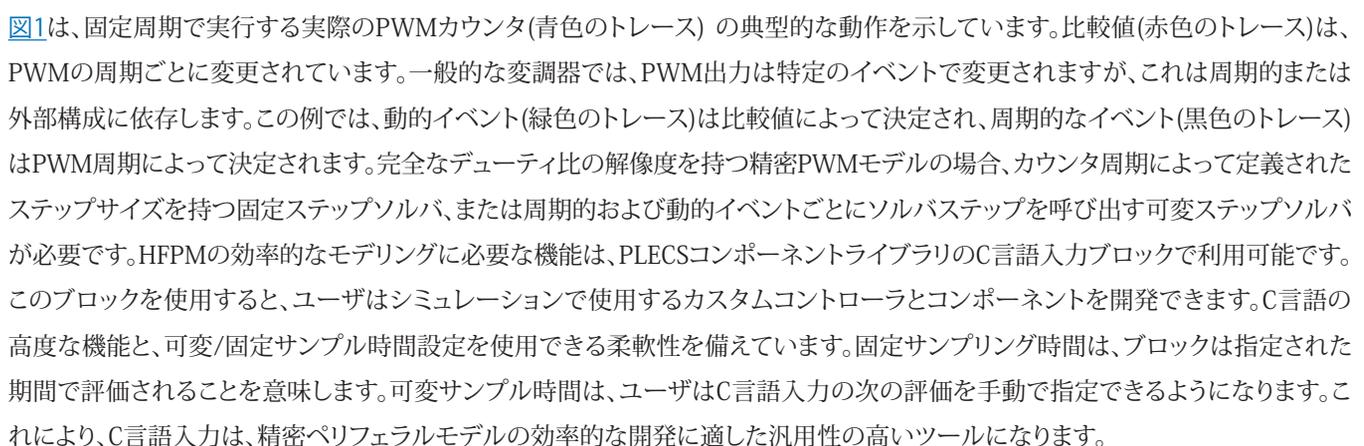
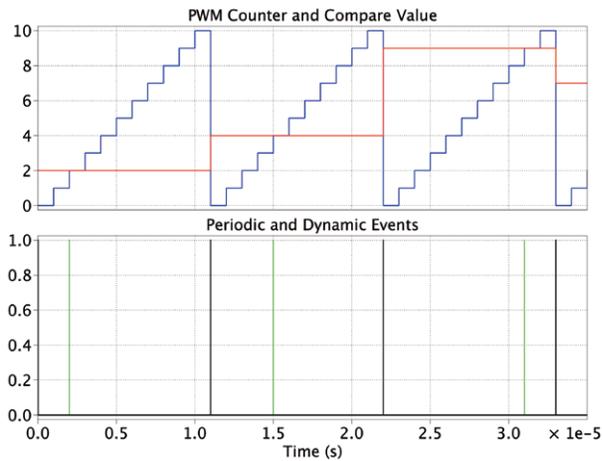
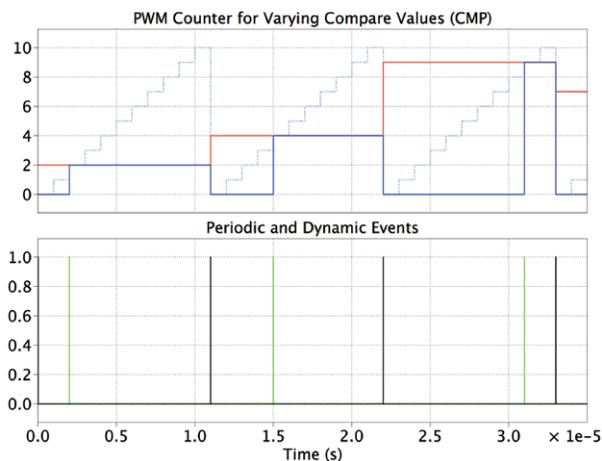
図1は、固定周期で実行する実際のPWMカウンタ(青色のトレース)の典型的な動作を示しています。比較値(赤色のトレース)は、PWMの周期ごとに変更されています。一般的な変調器では、PWM出力は特定のイベントで変更されますが、これは周期的または外部構成に依存します。この例では、動的イベント(緑色のトレース)は比較値によって決定され、周期的なイベント(黒色のトレース)はPWM周期によって決定されます。完全なデューティ比の解像度を持つ精密PWMモデルの場合、カウンタ周期によって定義されたステップサイズを持つ固定ステップソルバ、または周期的および動的イベントごとにソルバステップを呼び出す可変ステップソルバが必要です。HFPMの効率的なモデリングに必要な機能は、PLECSコンポーネントライブラリのC言語入力ブロックで利用可能です。このブロックを使用すると、ユーザはシミュレーションで使用するカスタムコントローラとコンポーネントを開発できます。C言語の高度な機能と、可変/固定サンプル時間設定を使用できる柔軟性を備えています。固定サンプリング時間は、ブロックは指定された期間で評価されることを意味します。可変サンプル時間は、ユーザはC言語入力の次の評価を手動で指定できるようになります。これにより、C言語入力は、精密ペリフェラルモデルの効率的な開発に適した汎用性の高いツールになります。

図1: PWMモジュールの典型的なカウンタ動作



PWMモジュールを効率的にモデリングするために、C言語入力ブロックは固定サンプル時間を使用するように定義されており、これによりPWM周期の周期的なイベント(黒色のトレース)を決定します。これらのイベントでは、次の動的イベント(緑色のトレース)の時間を計算し、ソルバはC言語入力ブロックの可変サンプル時間を使用してその瞬間にブロックを評価します。これにより、PWMモデルを関連する時点でのみ評価できるため、精密PWMを実装するための最も効率的な手法となります。図2に示すように、モデリングしたカウンタ値(青色のトレース)は、その瞬間にのみ更新していますが、実際のカウンタ値(点線のトレース)と一致します。この手法では、カウンタ周期に基づくモデルの非常に非効率的なサンプリングを必要とせず、完全なPWM分解能が得られます。

図2: PWM動作の効率的な実装

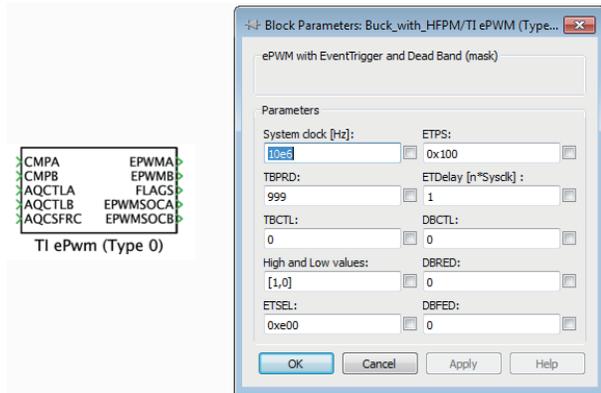


### 3 PLECSによるTI ePWM(Type 0)モジュールのモデリング

TIのC2000シリーズのType 0 ePWMモジュール[1]をPLECSでモデルリングしました。このモジュールは、2つの独立したPWM出力信号を生成することができます。Event Triggerサブモジュールは、ADC変換を動的にトリガしたり、割り込みを制御したりするために使用できます。さらに、PWM出力を反転したり、2つの出力間にデッドタイムを実装するように構成できるDeadbandサブモジュールが含まれています。

図3は、ePWMモジュールのPLECSモデルとそのパラメータマスクを示しています。ブロックの構成は、静的パラメータと非静的パラメータに分けられます。ユーザはマスクパラメータで、基本カウンタ周期(System Clock)、PWM周期(TBPRD)、カウンタの動作(TBCTL)などの一般的な静的パラメータを指定できます。さらに、ETxパラメータはEvent Triggerサブモジュールの動作を定義し、DBxパラメータはDeadbandサブモジュールを構成するために使用できます。これらのパラメータは、ハードウェアで使用されるレジスタに直接対応しており、整数、バイナリ、または16進数として入力できます。これにより、ユーザはシミュレーション環境でハードウェア構成をテストできるようになります。2つのカウンタ比較入力(CMPAとCMPB)はePWMモデルの動的イベントを定義し、アクション修飾子制御レジスタ(Action Qualifier Control Registers: AQCTLx)入力はこれらのイベントでのアクションを構成するために使用します。たとえば、出力EPWMAは、カウンタがCMPBに等しいときにhighに設定し、PWM周期でリセットするように構成できます。レジスタはePWMブロックへの入力として実装されており、シミュレーションの実行中に変更できます。Type 0 ePWMモジュールとその構成の詳細については、TIのWebサイトを参照してください。

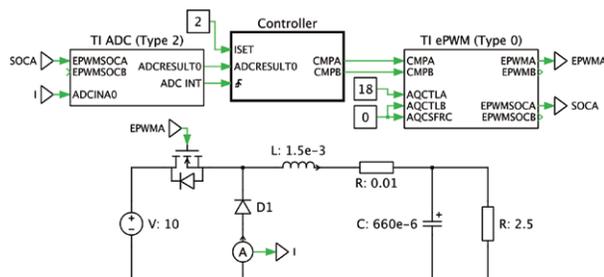
図3: PLECSで実装したTIのType 0 ePWMモジュールのモデル



## 4 シミュレーション結果

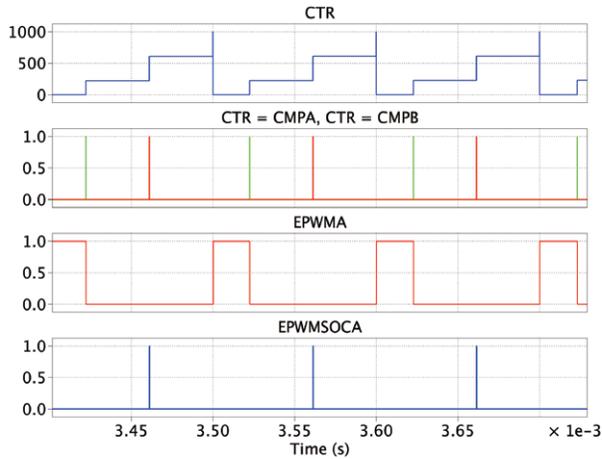
HFPMの利点をさらに説明するために、前述のePWMモジュールとTI Type 2 ADCモジュール[2]のHFPMを使用して、電流制御降圧コンバータが開発されました。図4に示すように、電流測定は、ダイオードと直列に接続された単純なシャント抵抗を使用して実現しています。このような構成では、ダイオードが導通している間、理想的には導通位相の中心で電流をサンプリングする必要があります。このような構成では、ダイオードが導通している間、理想的には導通相の中心で電流をサンプリングする必要があります。

図4: ペリフェラルモデルを備えた電流制御降圧コンバータ



ePWMは、周波数10kHzのアップカウントモードで動作するように構成されています。さらに、EPWMA信号は、AQCTLAレジスタで定義されているように、カウンタがゼロのときにhighに設定され、CTR = CMPAイベント(緑色のトレース)が発生したときにlowに設定されるように構成されています。図5はePWMモジュールの結果の特性を示しています。すでに述べたように、このブロックは関連する時点でのみ評価されるため、カウンタ値はその瞬間にのみ更新されます。

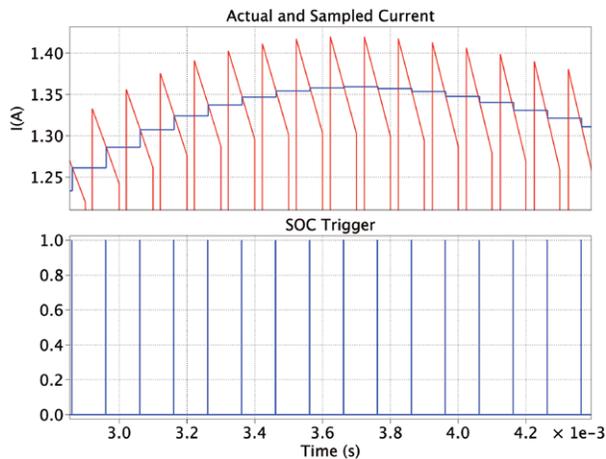
図5: ePWMモデルに基づくPWM変調と変換トリガ



さらに、内部のEvent Triggerモジュールは、すべての CTR = CMPBイベント(赤色のトレース)ごとにEPWMSOCAトリガを呼び出すように構成されています。これは図4に示すように、電流測定のためにADC SOCをトリガするために使用します。測定が終了すると、ADC割り込みが生成されてコントローラがトリガされ、ePWMモジュールのCMPAレジスタとCMPBレジスタが更新されます。

図6は、起動過渡時の実際のダイオード電流(赤色のトレース)とサンプリングされた電流(青色のトレース)を示しています。図に示すように、ADCは常にダイオードが電流を導通している間隔の中間点で電流を測定するようにトリガします。このグラフには、ADCモジュールのSOCトリガとして使用するEPWMSOCA信号も示しています。

図6: ePWMモジュールによる電流測定



## 5 まとめ

HFPMを使用すると、ユーザは実際のシステムをより正確に表現するモデルを開発できます。提案された実装により、PWM分解能やサポートされている機能に制限を設けることなく、これらのモデルをシステムレベルのシミュレーションに効率的に統合できます。

## 6 参考文献

- [1] “Tms320x2833x, 2823x enhanced pulse width tms320x2833x, 2823x enhanced pulse width modulator (epwm) module,” July 2009.
- [2] “Tms320x2833x analog-to-digital converter (adc) module,” *Literature Number: SPRU812A*, October 2007

改訂履歴:

07-14

初版



**Pleximへの連絡方法:**

☎ +41 44 533 51 00	Phone
+41 44 533 51 01	Fax
✉ Plexim GmbH	Mail
Technoparkstrasse 1	
8005 Zurich	
Switzerland	
@ info@plexim.com	Email
http://www.plexim.com	Web



**アドバンオートメーションへの連絡方法:**

☎ +81 3 5282 7047	Phone
+81 3 5282 0808	Fax
✉ 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

*Application Examples*

© 2002–2014 by Plexim GmbH

このマニュアルで記載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の事前の書面による同意なしに、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。