

# Embedded Code Generation *DEMO MODEL*

## Buck Converter BOOSTXL

降圧コンバータBOOSTXL

- TI C2000 MCUの組み込みコード生成によるRCP -

Last updated in C2000 TSP 2.2.1

# 1 はじめに

このデモモデルは、Texas Instruments社のリファレンス・デザイン・キット[1]を使用して実際の同期降圧コンバータを制御する方法を示しています。TI C2000 MCUは、コントローラサブシステムから生成されたコードを使用してPLECSから直接プログラムされます。降圧コンバータは動的負荷に対応し、開ループ制御または閉ループ制御で動作させることができます。TI 28379D、28377S、28P650DK9、29H850TU、または280049C LaunchPadを使用して生成されたコードを実行します。

**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:

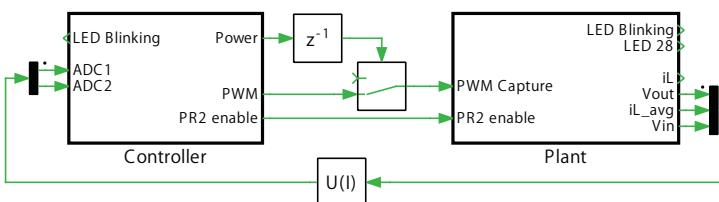
PLECS Standalone: シミュレーションメニュー -> シミュレーション・パラメータ... -> 初期化

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 モデル

最上位レベルの回路図には、[図1](#)に示すように、コントローラとプラントモデルを表す2つのサブシステムが含まれています。サブシステムは、**編集メニューからサブシステム -> 実行の設定...**により、コード生成機能を有効に設定できます。この構成は、PLECS Coderを介して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: プラントとコントローラサブシステムのトップレベルの回路図



### 2.1 電源回路

[図2](#)の電源回路は、TIのBOOSTXL-BUCKCONV Booster Packの回路図に対応しています。 $V_{DC} = 9V$ のDC電源電圧によって供給しています。

抵抗器R4はインダクタL1の電流を検出するために使用します。オペアンプU2の伝達特性は、ゲイン(利得)ブロックU2を使用して実装しています。"iL\_avg"信号のRCローパスフィルタは、1次伝達関数としてモデル化しています。静的負荷PR1は、降圧コンバータの出力とグラウンドの間に固定接続しています。動的負荷PR2は、スイッチ(シングル)Q1を制御することによってオンまたはオフに切り替えることができます。PR2がオンになると、出力負荷が増加し、インダクタ電流は正でゼロ以外を維持します。この機能は、実行時にアクティブロード機能を提供して、過渡性能試験をサポートします。

プラントモデルはTI社のリファレンス・デザインに基づいているため、入力電圧、出力電圧、負荷インダクタ電流は電圧および電流検出回路に応じてスケールリングされます。入力出力電圧の検出はどちらも抵抗分圧回路に基づいています。

### 2.2 コントロール

コントローラサブシステムを[図3](#)に示します。BOOSTXL-BUCKCONV、RT Box、およびサポートしているTI LAUNCHXL評価ボード間の主要なインタフェース信号を[表1](#)に示します。

図2: アクティブロードを備えた降圧コンバータの電源回路

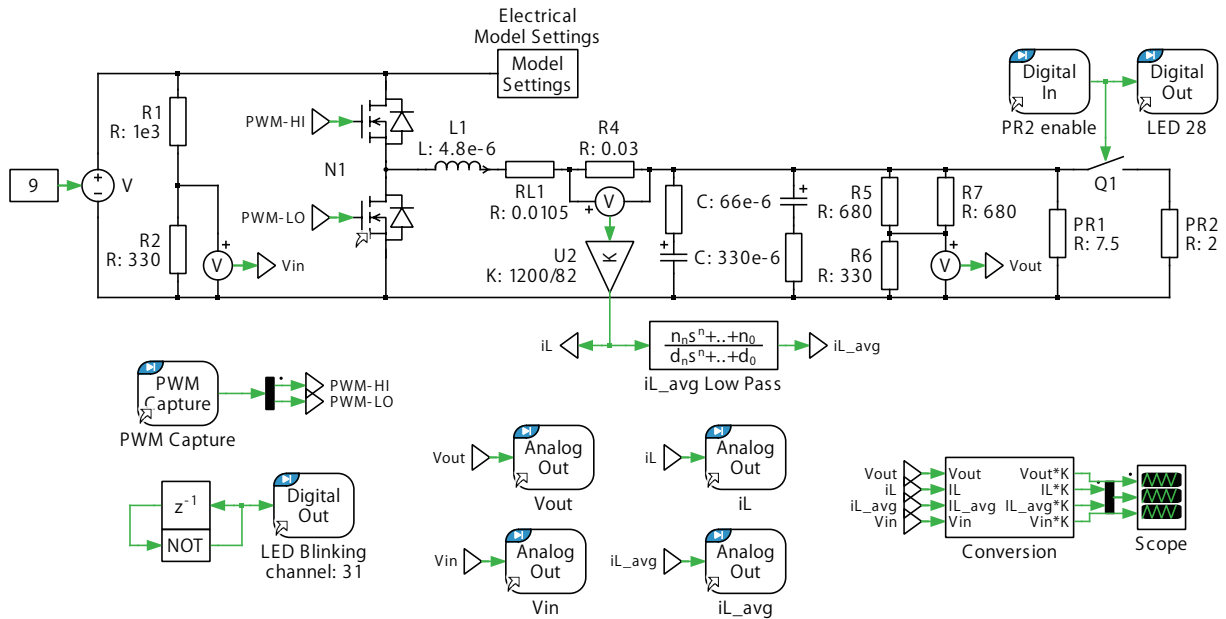
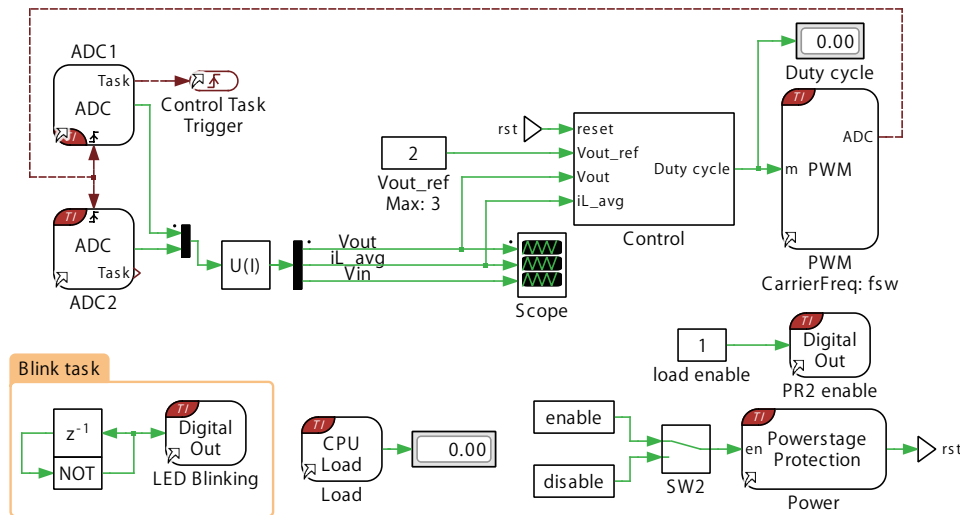


図3: BOOSTXL-BUCKCONV BoosterPackコントローラ



開ループ

Controllerサブシステムの構成が"Open\_loop"に設定されている場合、降圧コンバータの出力電圧は、フィードバックループなしで事前に決定されたデューティ比を使用して制御されます。ADC測定はユーザの観察にのみ使用されます。デューティ比の変化率は、入力制限ブロックを使用して制限され、最大値は飽和ブロックによって制限されます。

閉ループ

"Closed\_loop"構成を選択すると、降圧コンバータの出力電圧は、外部電圧と内部電流のフィードバックループを使用して制御されます。コントローラの実装を図4に示します。電圧補償器は、検知したDC出力信号をリファレンスと比較することにより、DCバス電圧を調整します。生成されたエラー信号は電流補償器への入力として使用され、その出力である変調指数mはPWM変調器に供給されます。電圧補償器と電流補償器の両方で、PLECSコンポーネントライブラリの連続系PID制御器ブロックを使用します。スイッチング周波数は200kHzです。

表1: LaunchPad, BOOSTXL-BUCKCONV, RT Box間の主要信号接続(Part 1)

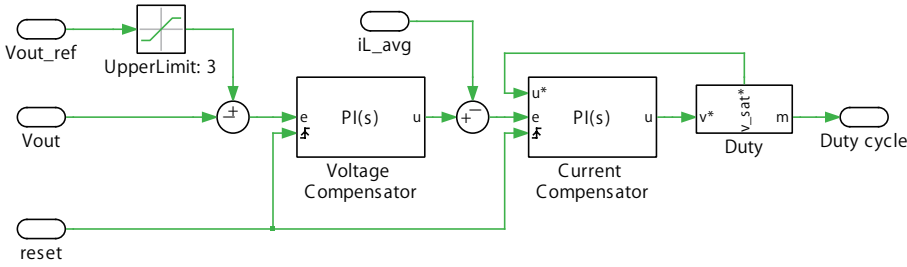
BOOSTXL-BUCKCONV	Description	LAUNCHXL-Pin	RT Box Channel	F28379D	F283775	F280049C
H3[1] PWM-HI	High-side drive signal for synchronous buck	J8[80]	DI16	EPWM4A	EPWM2A	EPWM1A
H3[2] PWM-LO	Low-side drive signal for synchronous buck	J8[79]	DI17	EPWM4B	EPWM2B	EPWM1B
H3[5] DO-Load	PWM duty control signal for active load	J8[76]	DI20	GPIO10	GPIO18	GPIO2
H2[7] VoutFB	Output voltage feedback	J7[67]	AO12	ADCINC4	ADCINA3	ADCINC3
H2[9] ILFB	Inductor current feedback (overcurrent protection)	J7[69]	AO14	ADCINA4	ADCINA4	ADCINA3
H2[4] ILFB_AVG	Inductor current feedback (heavily filtered average)	J7[64]	AO9	ADCINC5	ADCINA2	ADCINB6
H2[8] VinFB	Input voltage feedback	J7[68]	AO13	ADCINB4	ADCINB3	ADCINC5

表2: LaunchPad, BOOSTXL-BUCKCONV, RT Box間の主要信号接続(Part 2)

BOOSTXL-BUCKCONV	Description	LAUNCHXL-Pin	RT Box Channel	F28P650DK9	F29H850TU
H3[1] PWM-HI	High-side drive signal for synchronous buck	J8[80]	DI16	EPWM2A	EPWM4A
H3[2] PWM-LO	Low-side drive signal for synchronous buck	J8[79]	DI17	EPWM2B	EPWM4B
H3[5] DO-Load	PWM duty control signal for active load	J8[76]	DI20	GPIO99	GPIO12
H2[7] VoutFB	Output voltage feedback	J7[67]	AO12	ADCINA10	ADCINB9
H2[9] ILFB	Inductor current feedback (overcurrent protection)	J7[69]	AO14	ADCINC6	ADCINE1
H2[4] ILFB_AVG	Inductor current feedback (heavily filtered average)	J7[64]	AO9	ADCINA8	ADCINE24
H2[8] VinFB	Input voltage feedback	J7[68]	AO13	ADCINB6	ADCINE28

閉ループコントローラは、抵抗器PR2が有効になっている連続導通モード(Continuous Conduction Mode: CCM)用に設計されています。制御器パラメータは[7]に従って計算します。コントローラのパラメータ計算に関する詳細な説明は、PLECSデモモデルの"3レベル昇圧PFCコンバータ(Three-Level Boost PFC Converter)"に記載されています。

図4: 閉ループコントローラの実装

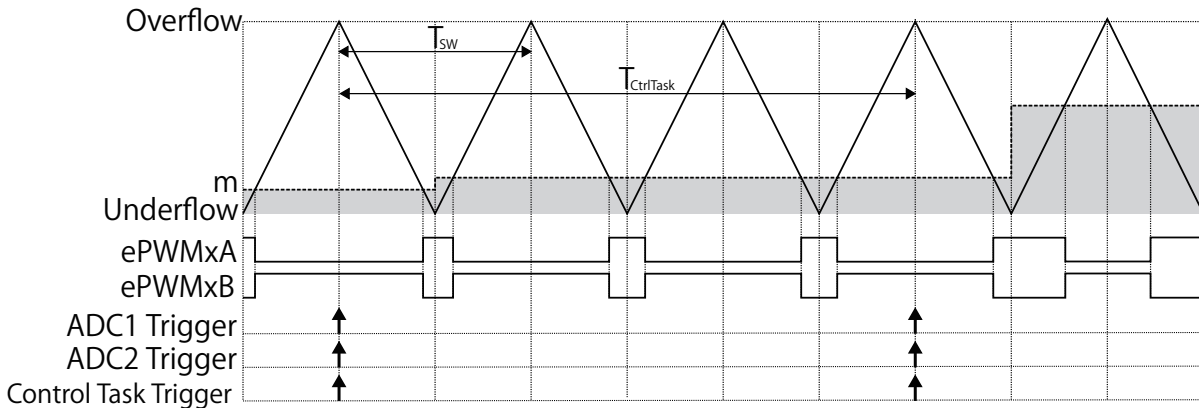


TI C2000 Targetライブラリコンポーネントの構成

- 制御タスクトリガ** このモデルでは、PWM発生器、ADC、および制御タスク トリガ間のトリガ信号を接続することで、組み込みアプリケーションの割り込みシーケンスが明示的に定義されます。トリガ信号は、[図3](#)の赤い破線で表示されます。PWMブロックのパラメータウィンドウの**Events**タブから、**ADC trigger**パラメータが**Overflow**として構成され、**ADC trigger divider**は、TI2837xおよびTI28P650xの場合は3、TI28004x MCUの場合は6に設定されます。これは、設定された数のOverflowイベント後にADCの変換開始がトリガされることを意味します。[図5](#)は**ADC trigger divider**を3に設定した場合の、対応するPWMキャリア、ADCおよびタスクトリガ、PWM出力を示しています。

デフォルトでは、C2000 Target Support Packageは、データの破損を防ぐために、PWMアンダーフローおよびオーバーフローイベントでのみePWMデューティ比レジスタを更新します。[図5](#)では、タスクトリガとePWMモジュールにおけるデューティ比mが更新される瞬間との間の遅延に注意してください。制御タスクはADCの変換終了によってトリガされ、すべてのADCチャンネルが変換されて制御タスクが完了した後、次のアンダーフローイベントで変調指数が更新されます。

図5: PWMキャリア、ADC、タスク割り込み



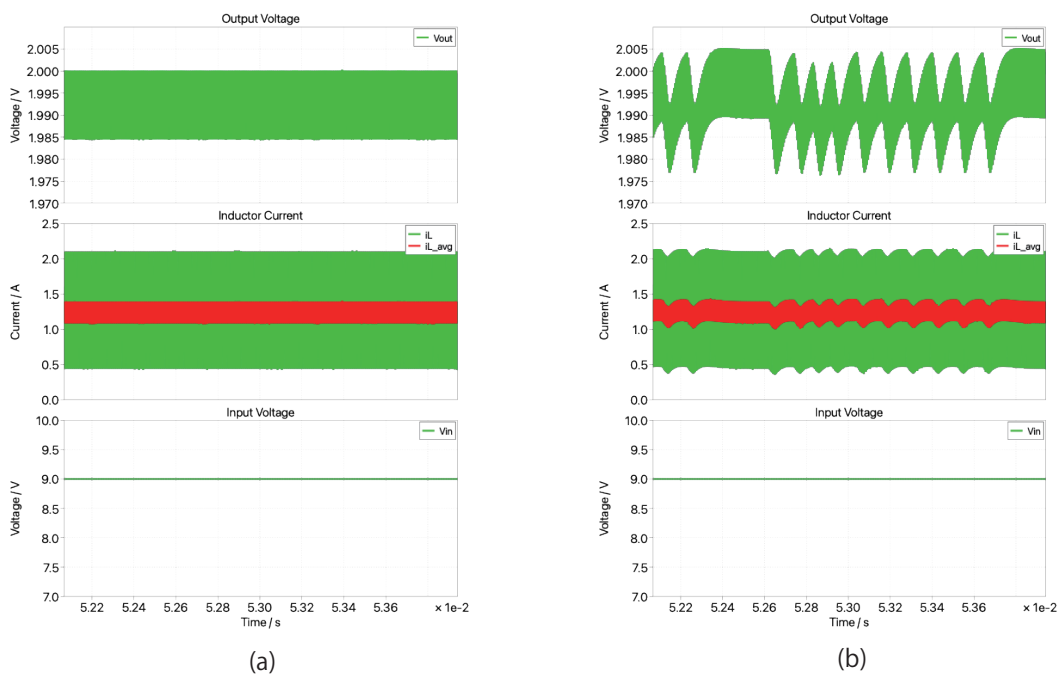
- Powerstage Protection** Powerstage Protectionブロックは、ターゲットデバイス上のすべてのPWM出力を有効化または無効化するための安全機構であるインターロックを実装します。"en"というラベルの入力信号が論理的にlowからhighに遷移しない限り、PWM出力は無効化されます。これにより、ターゲット上でコードが実行された直後にPWM信号がアクティブになることを防ぎ、安全な動作を保証します。詳細は、このブロックのヘルプを参照してください。"LED9"または"LED4"(シミュレーションメニューからシミュレーション・パラメーター...の**初期化**タブにある**モデル初期化コマンド**ウィンドウにリストされている GPIO "DO\_DSP\_LED2"に対応)は、パワー ステージのステータスを示します(LEDが点灯している場合は、PWM出力がアクティブであることを意味します)。

さらに、Powerstage Protectionブロック内に保護機能が実装されています。アナログトリップ値6Aは、**Coder -> Coder オプション -> ターゲットタブ + Protections**サブタブのパラメータを使用して定義されます。インダクタ電流がこの値を超えると、トリップ信号Aがトリガされます。このトリップ信号A に対する反応は、Powerstage Protectionブロックの **Protection**タブで定義されます。

### 3 シミュレーション

このデモ モデルは、より高いスイッチング周波数での高分解能デューティモードの必要性を示しています。高分解能の制御を行わない場合、デューティ比の分解能の制限により制御ループにリミットサイクルが生じ、出力電圧にリップルとして現れる可能性があります。高分解能デューティモードを有効にすると、より細かいデューティ比調整が可能になり、量子化誤差が低減し、電圧リップルが最小限に抑えられるため、この影響が軽減されます(図6)。

図6: 高分解能デューティモードのオフラインシミュレーション有効(a)と無効(b)

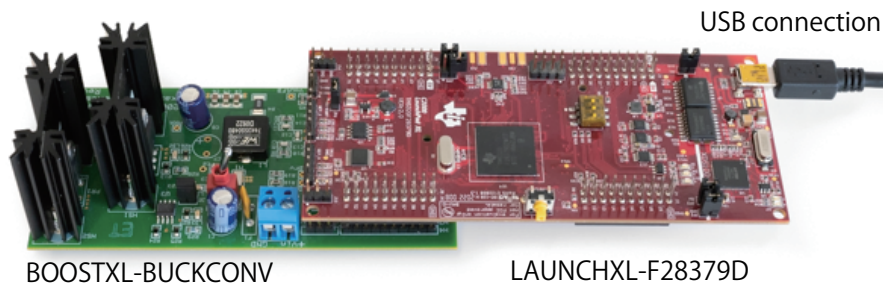


このデモモデルのシミュレーションをコンピュータ上でオフラインモードで実行するだけでなく、"Controller"サブシステムをTI C2000 MCUのターゲット固有のコードに直接変換することもできます。すべてのペリフェラルブロック(ADC、PWMなど)のデフォルトのI/O構成は、TI 280049C [3]、TI 28P650DK9 [6]、TI 29H850TU [7]、およびTI 28379D [5] LaunchPadをサポートしています。

さらに、デモモデルではTI 28377S [4] LaunchPad用のコード生成が可能です。この構成は、**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...** -> **初期化タブのモデル初期化コマンド**ウィンドウに移動し、board\_typeの値を変更して、目的のボードを選択します。また、**Coderオプション**ウィンドウで対応する**ターゲット**と**Board**タイプを適切に構成する必要があります。

BOOSTXL-BUCKCONVハードウェアを使用してリアルタイムシミュレーションを実行できます。

図7: BOOSTXLとTI C2000 Launchpadのハードウェア設定



### TI C2000ターゲットのハードウェア構成

TI 28377またはTI 28379D LaunchPadをBOOSTXL-BUCKCONVハードウェアに接続する前に、次の構成手順に従ってください:

- 電源ジャンパ(JP1、JP2、JP3)を取り付けます。
- ジャンパJP4を取り付けてコネクタ側2に電源を供給し、ジャンパJP5を外して3.3Vを供給するようにします。
- USBポートからの5V電源を使用するには、ジャンパJP6(TI 28379Dのみ)を外します。

TI 28P650DK9 LaunchPadをBOOSTXL-BUCKCONVハードウェアに接続する前に、次の構成手順に従ってください:

- 電源ジャンパ(JP1)を取り付けます。
- JP8(J5側)にジャンパを取り付けてコネクタ側2に電源を供給し、JP8(J7側)のジャンパを外して、3.3Vを供給するようにします。
- USBポートからの5V電源を使用するには、ジャンパ J17を外します。
- ジャンパJ15を外し、3.3V内部リファレンス電圧を使用できるようにします。

TI 29H850TU LaunchPadをBOOSTXL-BUCKCONVハードウェアに接続する前に、次の構成手順に従ってください:

- 電源ジャンパ(JP1)を取り付けます。
- JP8(J5側)にジャンパを取り付けてコネクタ側2に電源を供給し、JP8(J7側)のジャンパを外して、3.3Vを供給するようにします。
- USBポートからの5V電源を使用するには、ジャンパ J17を外します。
- 3.3 V内部リファレンスを使用できるようにS6 DIPスイッチを構成します。

TI 280049C LaunchPadの設定については[\[2\]](#)を参照してください。

### BOOSTXL-BUCKCONVハードウェアの構成

- J1[1]とJ1[2]間にジャンパを挿入し、信号H3[2]をPWM-LOのソースとして選択します。
- アクティブロードのMOSFETドライバに電力を供給するため、J2にジャンパを取り付けます。
- トグルスイッチ**SW1**をOFF(ヒートシンクから離れる方向)にして、JP1をプラントから分離します。
- 電源を切った9V DC電源のリード線を端子台JP1に挿入します。

---

**注意** ジャンパの構成が誤っていると、BOOSTXL-BUCKCONVボードが損傷する可能性があります。このドキュメントに記載されている手順に厳密に従ってLaunchPadとBOOSTXL-BUCKCONV ハードウェアを構成してください。

---

LaunchPadとBOOSTXL-BUCKCONVが上記のように構成したら、[図7](#)に示すように、LaunchPadをBOOSTXL-BUCKCONVハードウェアに配置できます。

## MCUをプログラム

以下の手順に従って、"Controller"サブシステムをLaunchPadにプログラムします:

- USBケーブルでMCUを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**タブで、ドロップダウンメニューから適切なターゲットを選択します。この設定では、TI28379SにもTI28379Dプロセッサにも対応します。次に、**General**サブタブで、目的の**Build type**を選択します。
- PLECS から MCU を直接Build and programするには、**Build configuration**としてRun from RAMを選択してMCUをRAMにフラッシュするようにプログラムし、**Board**でLaunchPadを選択して、**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、LED "D9"または"LED4"(モデル初期化コマンドにリストされているGPIO "DO\_DSP\_LED1"に対応)が点滅します。

## 外部モード

PWM信号は保護のためデフォルトで無効化されています。これらを有効にするには、以下の手順に従ってMCUを外部モードに接続する必要があります:

- まず、**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。
- その後、**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。

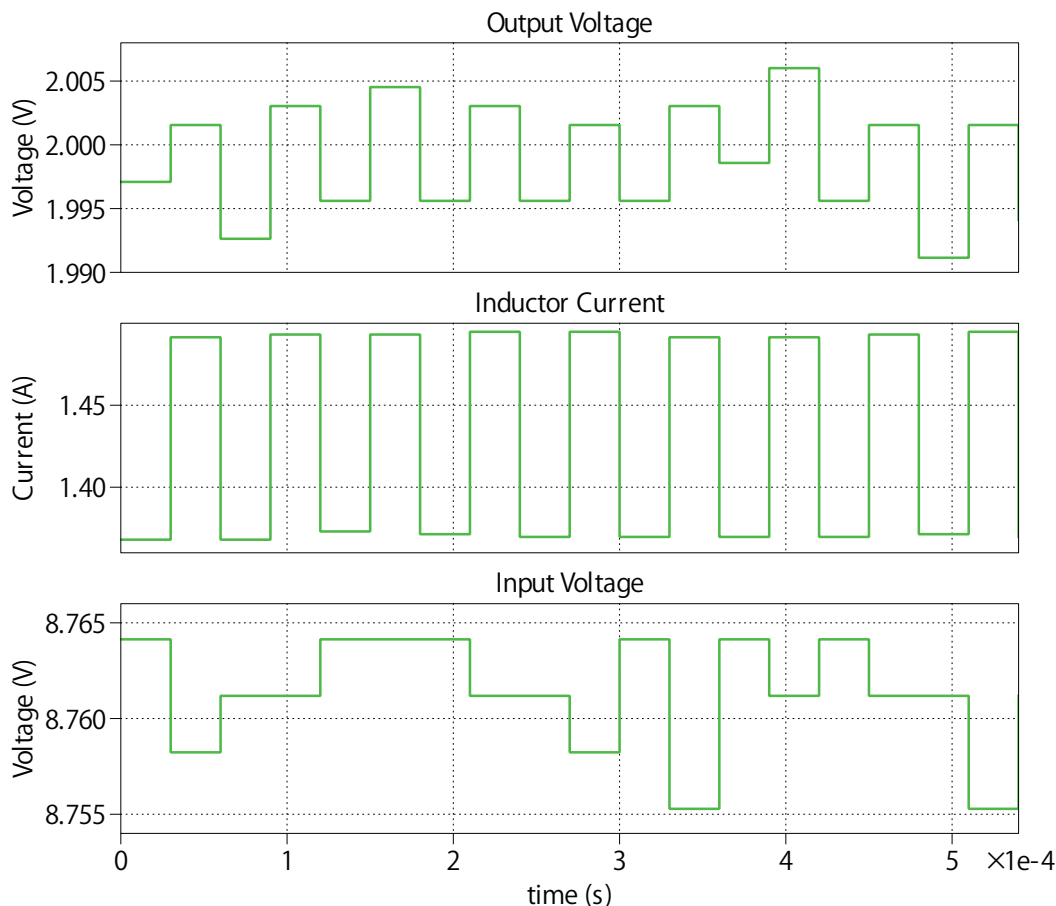
## パワーステージの有効化

ここで、"Controller"サブシステムのPLECSスコープウィンドウから、入力電圧のリアルタイム値が約9VDCであることを確認します。他の測定値はすべてゼロに近い値になるはずですが。この場合は、以下の手順に従ってパワーステージを有効にしてください:

- BOOSTXL-BUCKCONVのスイッチ**SW1**をON(ヒートシンクに向ける)に切り替えて、パワーステージに電力を供給します。
- PWM 信号を有効にするには、Controllerサブシステムの手動切替スイッチ**SW2**を有効から無効に切り替え、その後、再び有効に戻します。モデル初期化コマンドにリストされているGPIO "DO\_DSP\_LED2"に対応するLEDがONになるはずですが。

モデルのデフォルト構成では、出力電圧は2Vに制御され、負荷"PR2"が有効になっています。リアルタイムの電圧と電流の測定値は、[図8](#)のようになります。

図8: TI 28379D MCUで検出されたリアルタイムの電圧と電流値



### パラメータのインライン化

"Vout\_ref"パラメータが**Coder** -> **Coderオプションウィンドウのパラメータのインライン化**タブの例外リストに追加されているため、この値は実行時に調整可能です。パラメータの変更は、有効になるとすぐにPLECSスコープのトレースに反映されます。"Vout\_ref"の最大値は保護のため、3に設定されていることに注意してください。

デフォルトでは、モデルは負荷PR2が有効にした閉ループ操作で実行されます。モデルを開ループ動作で実行するか、負荷PR2を無効にするには、まずパワーステージを無効にします。次に、"Controller"サブシステムを必要に応じて変更し、"Vout\_ref"を0に設定します。次に、MCUを再プログラムし、パワーステージを有効にし、"Vout\_ref"の値を徐々に増加させます。

## 4 まとめ

このモデルは、PLECS から自動的に生成されたコードを使用して、TI C2000 MCUで実際のパワーステージを制御する方法を示しています。プラントとコントローラの統合モデルは、オフラインシミュレーションまたはリアルタイムで実行できます。PLECSが生成したTI C2000 MCU用の制御コードは、に実際のハードウェアを制御できます。

## 5 参考文献

- [1] TI Digital Buck Converter BoosterPack BOOSTXL-BUCKCONV,  
 URL: <https://www.ti.com/tool/TIDM-DC-DC-BUCK>

- [2] TI C2000 Digital Power Buck Converter BoosterPack Design Guide,  
URL: <https://www.ti.com/lit/ug/tidu986a/tidu986a.pdf>
- [3] TI C2000 Piccolo MCU F280049C LaunchPad Development Kit  
URL: <http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F280049C>
- [4] TI C2000 Delfino MCUs F28377S LaunchPad Development Kit  
URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/sprui25>
- [5] TI C2000 Delfino MCUs F28379D LaunchPad Development Kit  
URL: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28379D>
- [6] TI C2000 F28P650DK9 LaunchPad development kit,  
URL: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28P65X>.
- [7] TI C2000 F29H850TU LaunchPad development kit,  
URL: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F29H85X>.
- [8] Conception de systèmes automatiques, Hansruedi Bühler, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne 1988, ISBN 2-88074-149-1

## 6 付録: RT Boxによるリアルタイムシミュレーション

図9: HIL検証のハードウェアセットアップ



BOOSTXL-BUCKCONVハードウェアは、オプションでPLECS RT Box上でエミュレートして、ハードウェアインザループ(Hardware-In-the-Loop: HIL)テストを実行できます。"Plant"サブシステムは、[図2](#)に示すようにRT Box上に構築されるように構成されています。RT Boxを使用した一般的なHILテスト構成を[図9](#)に示します。ここでは、LaunchPad(LAUNCHXL)がRT Box LaunchPad インタフェースボードを介してRT Boxに接続されています。

改訂履歴:

C2000 TSP 1.5.9	初版
C2000 TSP 1.6.1	自動ピン選択を追加
C2000 TSP 1.9.1	F28P55xターゲットのサポートを追加
C2000 TSP 2.1.1	高分解能デューティ比モードを使用するようにPWM構成を更新
C2000 TSP 2.2.1	F29H85xターゲットのサポートを追加

 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

 **ADVANTION** 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 6285 0250 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

*Embedded Code Generation Demo Model*

© 2002–2024 by Plexim GmbH

このマニュアルに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。