

Embedded Code Generation *DEMO MODEL*

LLC Resonant Converter

LLC共振Converter

- TI C2000 MCU用の組み込みコード生成による共振コンバータの制御 -

Last updated in C2000 TSP 1.11.1

1 はじめに

ハーフブリッジLLC共振コンバータは、広範囲の動作条件でゼロ電圧スイッチング (Zero Voltage Switching: ZVS) を可能にし、スイッチング損失が比較的 low、効率が high、電力密度が高いため、バッテリー充電器や電源などのアプリケーションの DC/DC コンバータにとって魅力的なトポロジです。

このデモ モデルでは、Texas Instruments (TI) C2000 マイクロコントローラ (MCU) を使用した LLC コンバータの可変スイッチング周波数制御アプローチについて説明します。MCU は PLECS モデルから生成された組み込みコードを実行します。このモデルの電力ステージは TI LLC 共振ハーフブリッジコンバータ 300W 評価モジュール [1] に基づいています。

コントローラのパフォーマンスを評価に、ハードウェアインザループ (Hardware-in-the-Loop: HIL) テストを使用します。プラントモデルは PLECS RT Box 上で実行できるように最適化されています。このアプリケーションでは、高スイッチング周波数で正確なリアルタイムシミュレーションを実行するために、PLECS ライブラリの電気回路ブロック -> Nanostep にあるハーフブリッジ LLC コンバータモジュールを使用することが重要です。

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:

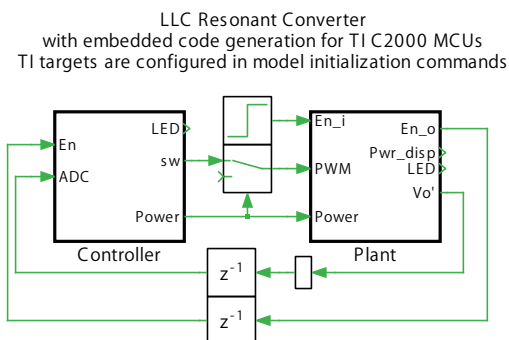
PLECS Standalone: シミュレーションメニュー -> シミュレーション・パラメータ... -> 初期化

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つのサブシステムで構成しています。両方両方のサブシステムは、**編集メニュー -> サブシステム -> 実行の設定...** から **コード生成機能の有効化** にチェックすると、コード生成が有効になります。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。

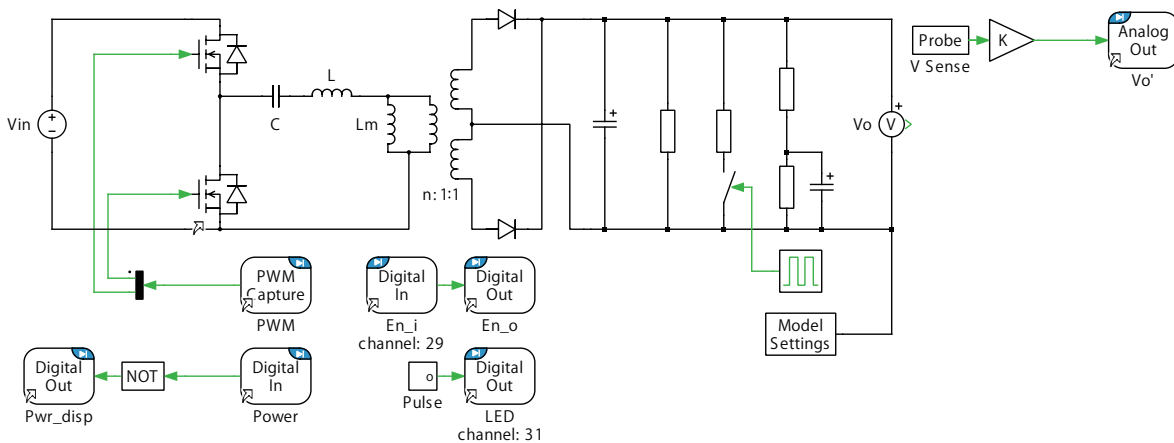
図1: プラントとコントローラサブシステムのトップレベルの回路図



2.1 電源回路

このモデルの電力ステージを [図2](#) に示します。この設計は、390V 入力とレギュレータ電圧 12V 出力を備えた TI LLC 共振ハーフブリッジコンバータ 300W 評価モジュールに基づいています。

図2: RT Boxに最適化されたプラントモデル



動作原理

LLCコンバータでは通常、ハーフブリッジを共振タンクの入力に方形波電圧信号を生成するように変調されます。共振タンクは、直列共振インダクタンス L_r 、磁化インダクタンス L_m 、および共振キャパシタ C_r で構成されます。上部および下部のスイッチ要素は、補完的な方法(適切なデッドタイムを使用)で変調され、通常は50%のデューティ比で変調されます。方形波電圧を入力すると、共振ネットワーク内に準正弦波電流が流れます。出力変圧器、整流回路、およびフィルタは、正弦波タンク電流からDC出力電圧を確立します。

ハーフブリッジからの入力方形波電圧の周波数を変更すると、共振タンクの有効インピーダンスが変化し、その結果、電流出力も変化します。共振タンクからのゲイン M を想定すると、入力電圧と出力電圧の関係は次のようになります:

$$V_o = M \frac{1}{n} \frac{V_{in}}{2}$$

LLCコンバータの直列共振周波数 f_0 は、 L_r と C_r の組み合わせのインピーダンスがゼロで、ゲイン M が1である点です(無損失回路の場合)。通常、コンバータは f_0 付近で動作します。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r C_r}}$$

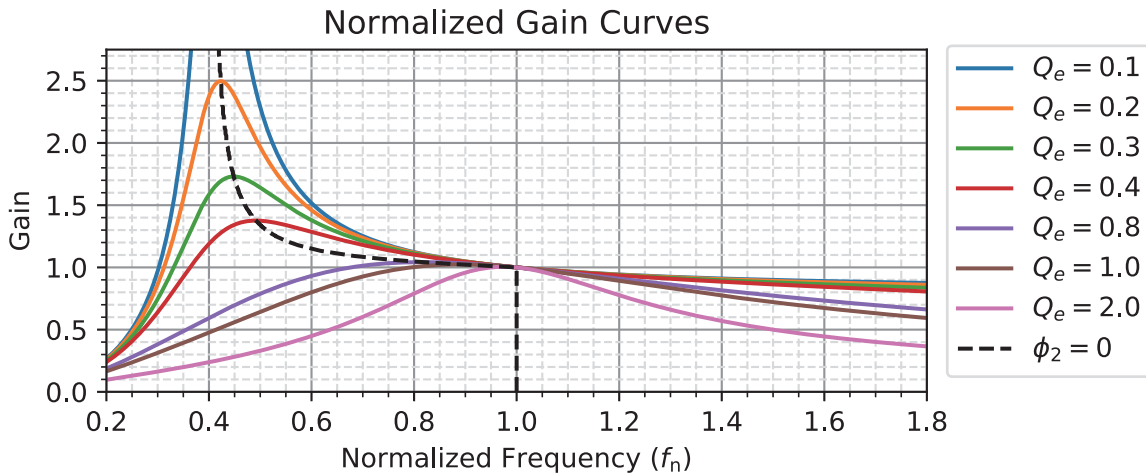
ただし、ゲインはスイッチング周波数とタンク設計だけでなく、コンバータの負荷抵抗 R_o にも依存します。DC出力抵抗 R_o は等価AC負荷抵抗 R_e で近似できます[2]。 R_e は、共振利得が周波数の関数としてどのように変化するかを定義する品質係数 Q_e を計算するために使用します。

$$R_e = \frac{8n^2}{\pi^2} R_o \text{ and } Q_e = \frac{1}{R_e} \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

図3は、スイッチング周波数と品質係数がロスレスコンバータのゲインにどのように影響するかを強調した一連の曲線を示しています。このモデルの電力ステージでは、定格負荷時に $Q_e = 0.41$ 、共振周波数は $f_0 = 138.5 \text{ kHz}$ です[1]。周波数軸は、 $f_n = f_{sw}/f_0$ のように正規化されます。

図3のφ2曲線は共振回路の位相がゼロになる点を示しており、低周波数での共振タンク内の容量性電流から高周波数での誘導性電流への移行を示しています。最初のハーフブリッジでZVSを実現するには、誘導電流を維持することが不可欠です。これにより、コンバータのスイッチング周波数が増加すると電圧ゲインが減少するという一貫した関係も維持されます。

図3: コンバータの正規化されたゲイン曲線



Nanostepのハーフブリッジ共振LLCコンバータモジュール

PLECSライブラリのNanostepセクションのハーフブリッジLLCコンバータコンポーネントを使用して実装します。RT BoxのNanostepソルバは、1桁台の範囲のナノ秒の時間ステップでシミュレーションを実行します。各タイムステップでゲート信号を検知し、コンバータの動作モードを決定し、タンク電流が計算されます。共振タンク内の高周波電流成分と頻繁な電流反転やクランプイベントのため、LLCなどの高周波共振コンバータトポロジを正確にモデル化するには、小さなステップサイズが重要です。

RT Boxの構成

RT BoxのPWM Captureターゲットブロックは、ハーフブリッジLLCコンバータNanostepコンポーネントのゲート信号に接続します。ゲート信号は、同じ1桁台の範囲のナノ秒の時間ステップサイズを持つNanostepソルバによって評価されます。

有効負荷抵抗は、出力抵抗を全負荷と半負荷間で切り替えるパルス発生器によって制御されます。可変負荷は、コントローラの性能を評価するために使用される外乱を与えます。分圧器は、RTBoxアナログ出力チャンネルにルーティングされる出力電圧のスケールリングされたバージョンを提供します。

ユーザが外部ステータススイッチを使用してコントローラおよび電源ステージを有効または無効にできるように、追加のデジタル信号が使用されます。

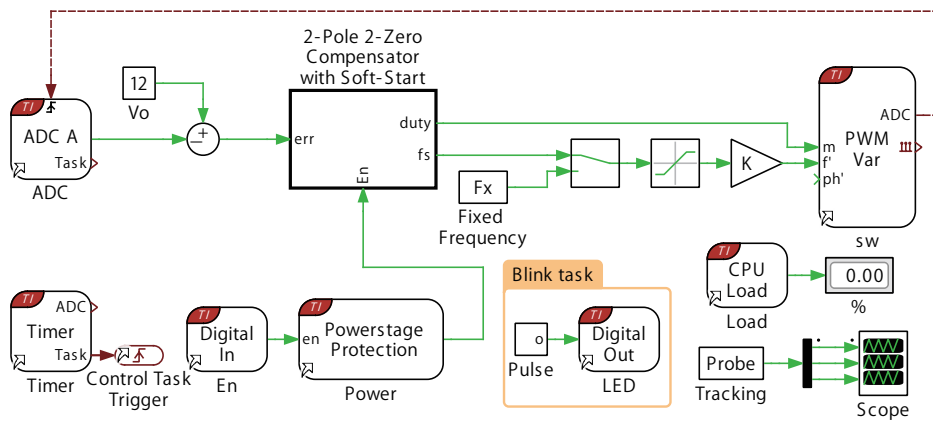
2.2 Controller

図4は、TI C2000 MCUの制御ロジックの概要を示しています。

コントローラは、アナログ/デジタルコンバータ(Analog-to-Digital Converter: ADC)を介して入力電圧を検知し、PWM出力のスイッチング周波数を変更することでLLCコンバータの出力電圧を調整します。さらに、手動切替スイッチは、レギュレータをバイパスして、コンバータをユーザ指定の固定周波数で動作させることができます。補償器の出力と"Fixed Frequency"の値は、直列共振周波数 f_r に正規化されます。出力は、定格最大負荷でコンバータがZVSを維持するように予想される動作範囲内に制限され、必要なスイッチング周波数を生成するように調整されます。

以下のコントロールの説明は、実際の電源ハードウェアを使用した実時間での操作に基づいています。

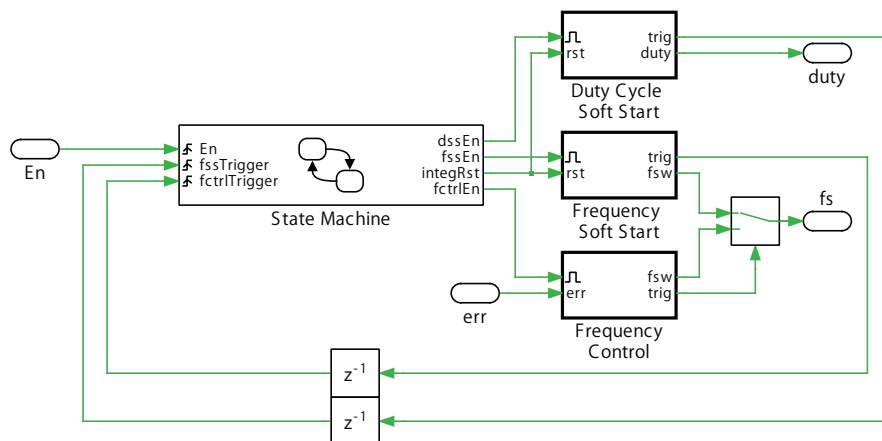
図4: Controllerサブシステムの回路図



Controllerの構造

図5は補償器とソフトスタート機構の実装を示しています。"En"入力がLowからHighに遷移するたびに、ステートマシンを使用してソフトスタートシーケンスを開始します。ステートマシン入力は、ソフトスタートアクションのステータスを示すトリガです。ステートマシンの出力は、3つの異なるイネーブルサブシステムを制御するために使用され、そのうちの1つだけが特定の時点でアクティブになります。イネーブルサブシステムを使用する利点は、イネーブル入力がLowの場合、サブシステム内のロジックは実行されず、MCUの計算負荷が軽減されることです。

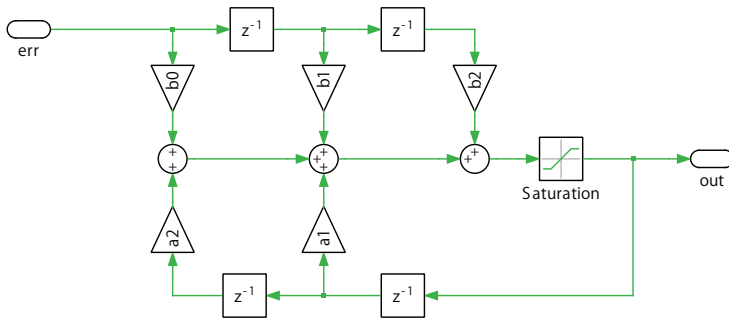
図5: Controllerのソフトスタート実装



ソフトスタートシーケンスは、定格負荷での予想される最終動作点の1.5倍のスイッチング周波数から開始されます。これにより、ソフトスタート時の曲線のZVS部分での動作と軽負荷状態での過剰なゲインを防止するため、より低い出力電圧が保証されます。周波数は固定されたまま、デューティー比は一定の周期にわたって0%から50%デューティーまで直線的に増加します。"Duty Cycle Soft Start"コンポーネントによってトリガ信号が生成され、周波数ソフトスタートメカニズムを開始します。次に、スイッチング周波数は、予想される最終スイッチング周波数まで直線的に低下します。"Frequency Soft Start"コンポーネントは、完了時にトリガを送信し、"Frequency Control"サブシステムをアクティブにします。このサブシステムには、2極2ゼロ(2P2Z)補償器が含まれています。論理Lowの"En"入力によってシーケンスが中断された場合、シーケンスは最初から再開されます。

2P2Z補償器は、図6に示すように、出力制限付き直接型のデジタル補償器として実装されています。コントローラパラメータは、まず拡張記述関数を使用してプラントの伝達関数を取得し、次に極零点マッチングを使用して連続領域でコントローラを設計し、最後に連続コントローラを離散化することによって決定されます[4]。最終設計ではクロスオーバー周波数は2kHzです。

図6: 2P2Z離散の実装



TI C2000 Targetライブラリコンポーネントの構成

図4の回路図には、TI C2000 Targetライブラリのいくつかのコンポーネントが含まれています。PWM(Variable)コンポーネントは、可変周波数のPWM信号を生成するために使用されます。ブロックへの入力“f”は、110kHzのコンポーネントマスクの**Carrier frequency**パラメータに正規化されます。PWM(Variable)ブロックは、ADCの変換開始(start-of-conversion: SOC)信号を生成するように構成されています。PWM(Variable)ブロックのパラメータウィンドウの**Events**タブで、**ADC Trigger**パラメータがUnderflowとして設定しています。次に、ADCブロックの**Trigger source**パラメータをShow trigger portに設定します。トリガ信号は、PWM(Variable)コンポーネントとADCコンポーネントを接続する赤色の破線として表示されます。

Timerコンポーネントは、PWM(Variable)コンポーネントの公称キャリア周波数の半分、つまり55kHzの固定レートで割り込みを生成します。TimerのTask出力は、PWM生成およびADCサンプリングとは非同期の制御タスクをトリガします。制御タスクは、補償器の応答の計算時に最新のADC測定を使用します。制御タスクを一定のレートで実行することで、離散2P2Z補償器とその他のモデル計算が適切に離散化されます。PWMでADC SOCをトリガすると、電圧測定の一貫したポイントオンウェーブサンプリング(Point-on-Wave sampling: PoW)が保証されます。

実行中にPWM信号を有効または無効にするには、RT Box Launch-Pad Interfaceボード上のDIPスイッチ“DI-29”を使用します。この入力信号“DI-29”は、“Plant”サブシステムの“En_i”というラベルのDigital Inブロックに接続され、その後、RT Box Launch-Pad Interfaceボードを介して“Controller”サブシステムのPowerstage Protectionブロックの入力としてルーティングされます。Powerstage Protectionブロックは、ターゲットMCU上のすべてのPWM出力を有効または無効にする有限ステートマシンを実装します。ロジックがLowからHighに遷移するとPWM出力が有効になり、HighからLowに遷移すると無効になります。Powerstage Protectionブロックの出力により、補償器とソフトスタートロジックも有効になります。詳細については、このブロックの**ヘルプ**を参照してください。

パワーステージが有効になっている場合、Powerstage Protectionブロックの**Powerstage enable GPIO number**で設定されているデジタル出力が切り替わります。この信号は、“Plant”サブシステムの“Power”というラベルのDigital Inブロックに接続されています。信号セクタコンポーネントは、ゲートドライバをモデル化するために使用されます。“Power”入力が論理的にLowの場合、ハーフブリッジゲート信号はすべてゼロになります。“Power”入力が論理Highになると、スイッチは“PWM”入力からの信号をMOSFETゲート信号に接続します。“Power”が論理Highになると、Launch-Pad Interfaceボード上の赤色LED “DO-29”も点灯し、スイッチング信号がMOSFETゲートに接続されていることが視覚的に示されます。

3 シミュレーション

モデルは、**シミュレーション**メニューから**開始**を選択すると、デスクトップコンピュータ上でオフラインで実行します。

図7は、起動シーケンスを強調表示した“Controller”サブシステムの結果を示しています。1msでコントローラが有効になり、ソフトスタートシーケンスが開始します。周波数は一定に保たれたまま、出力デューティは5msかけて0%から50%まで増加し始めます。その後、周波数は次の5msかけて上昇し始め、予想される最終動作点である約0.83 f_0 に達します。11msで2P2Z

補償器が作動し、出力電圧は12Vに調整されます。

出力負荷のステップ変化は20msと40msで確認でき、[図8](#)で強調されているように、短時間の電圧過渡現象が発生します。

図7: 起動時のControllerのパフォーマンス

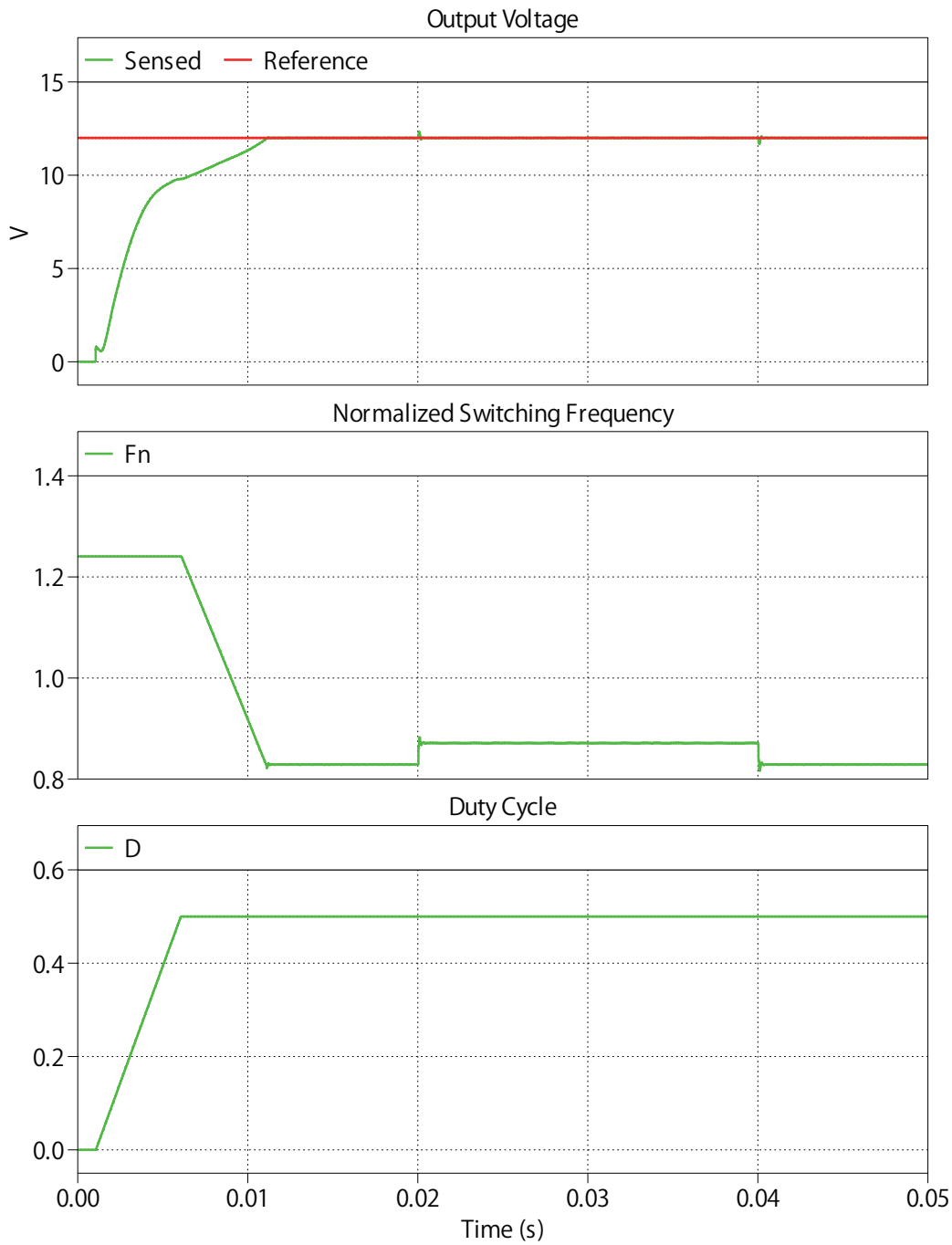
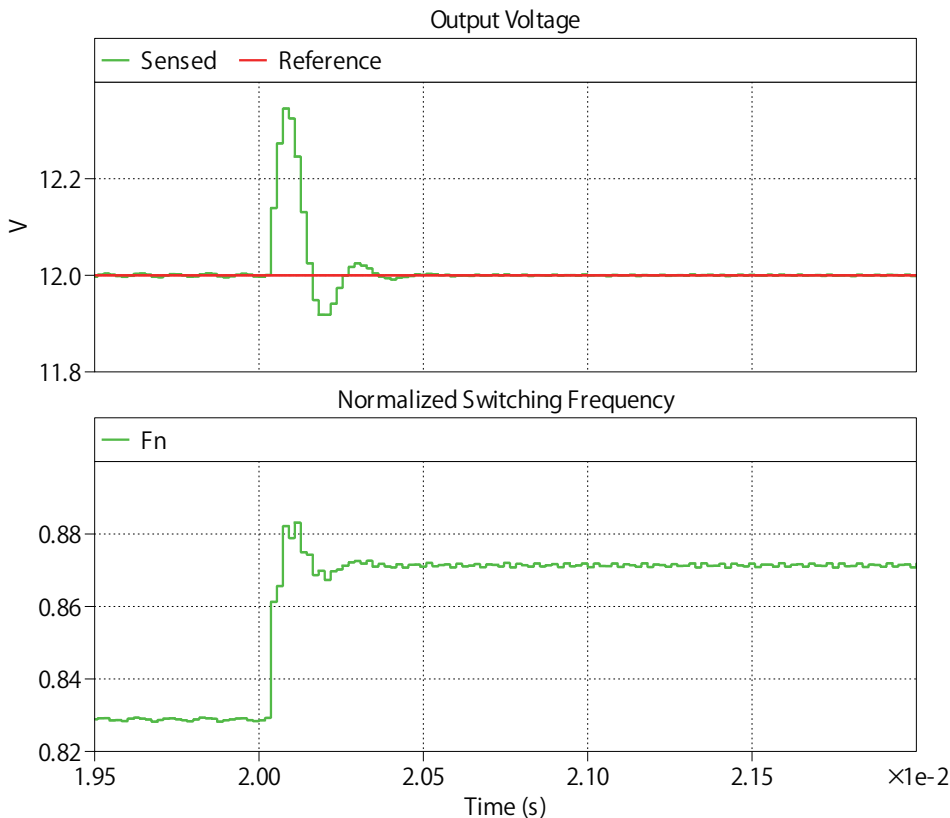


図8: 過渡時のControllerのパフォーマンス



3.1 TI C2000 Target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 280039C [5]、TI 28379D [7]、TI 28P550SJ9 [8]、TI 28P650DK9 [9] LaunchPad、およびTI 28388D [12] controlCARDをサポートします。

さらに、デモモデルでは、TI 280039C [10]およびTI 28379D [11]controlCARDのコード生成が可能です。この設定を行うには、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ー... -> 初期化タブから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。

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

- 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。そして、**General**サブタブで、目的の**Build type**を選択します。
- そして、PLECSからMCUを直接Build and programするには、**Build configuration**でFlash or Run from RAMを選択して、MCUフラッシュメモリまたはRAMにプログラムします。そして**Board type**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"(またはモデル初期化コマンドにリストされているGPIO "DO_DSP_LED"に対応するLED)が点滅します。

Code Composer Studio(CCS)に精通している上級ユーザー向けには、Generate code into CCS projectオプションがあります。CCSプロジェクトから適切なcgフォルダを探し(手順については[13]を参照)、そのパスを**CCS project directory**フィールドに入り、**ビルド**をクリックします。"Controller"サブシステムのコードが自動的に生成されます。通常のCCSプロジェクトとしてプロジェクトのビルドとデバッグに進みます。

注意 RT Box LaunchPad Interfaceボードを使用する場合は、シミュレーション中はRSTジャンパが開いていることを確認してください。

3.2 PLECS RT Boxの構成

プログラムしたMCUで実際のパワーステージを制御する前に、PLECS RT Boxで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。一般的なハードウェア構成を図9に示します。ここでは、評価キットであるTI 28379D LaunchPad(赤色のボード)が、RT Box LaunchPad Interface(緑色のボード)を介して RT Box に接続されています。

RT Box でリアルタイム モデルを実行するには、以下の手順に従います。RT Boxにビルドする前に、3.1に示すように、適切なTI MCU上に"Controller"サブシステムが構築済みであることを確認してください。

- **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**タブをクリックし、ターゲットデバイスを選択します。**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。
- モデルが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、RT Boxに**接続**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観察します。

正しくプログラムされていれば、RT Box LaunchPad Interfaceボードの"DO-31"に対応するLEDが点滅します。

2.2の最後で説明したように、RT Box LaunchPad Interfaceボード上のスイッチ"DI-29"をLowからHighに切り替えてMCUを有効にします。パワーステージが有効になると、LaunchPad Interfaceボードの"DO-29"に対応する LED が点灯します。"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。

図9: RT BoxによるHIL検証のハードウェアセットアップ
PLECS RT Box



注意 この段階で、RT Box LaunchPad Interfaceボード上の"DO-29"に対応するLEDがオンになっていることを確認します。

3.3 Controllerの起動と外部モードによる接続

RT Box LaunchPad Interfaceボード上のスイッチ"DI-29"をHighからLowに切り替えると、すべてのゲート信号が無効になります。LaunchPad Interfaceボード上の"DO-29" LEDはオフになります。"DI-29"をHighに戻すと、PWM出力が再び有効になり、"DO-29" LEDが点灯します。

MCU内の制御プログラムのパラメータを調整し、中間値を観察するには、以下の手順に従ってTI MCUの外部モードに接続します。

- まず、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)。
- そして、**Coder** -> **Coder オプション...**ウィンドウ左側の**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。

接続すると、閉ループ コントローラの電圧リファレンスを変更したり、手動切替スイッチをクリックして固定周波数モードで動作できるようになります。"Fixed Frequency"の値をリアルタイムで変更して、スイッチング周波数や負荷の変化にプラントがどのように反応するかを確認できます。

また、適切な信号(たとえば、デューティー比の立ち上がりエッジが1%を超えたとき)でトリガするように外部モードを構成することで、起動シーケンスを観察することもできます。**ターゲットチャンネル**は、**外部モード**タブで設定します。

4 まとめ

このモデルは、TI C2000 MCUの組み込みコード生成を使用して、ハーフブリッジLLC共振コンバータの閉ループ制御を示しています。オフラインモードとリアルタイムの両方で実行できます。コントローラは、ソフトスタートメカニズムと2P2Z補償器の個別実装を特徴としています。Nanostepソルバは、HILテストのモデル忠実度を高めるために使用しました。

5 参考文献

- [1] UCC25600EVM LLC Resonant Half-Bridge Converter 300-W Evaluation Module
URL: <http://www.ti.com/tool/BOOSTXL-DRV8305EVM>
- [2] Texas Instruments Power Supply Design Seminar: Designing an LLC resonant half-bridge power converter, Sept 2019.
URL: <https://www.ti.com/seclit/ml/slup263/slup263.pdf>.
- [3] 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*.
- [4] D. Patel and R. Kankanala, "Digital Compensator Design for LLC Resonant Converter", Microchip Application Notes AN1477, December 2018.
URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/AN14177,-Digital-Compensator-Designfor-LLC-Resonant-Converter-DS00001477B.pdf>

- [5] TI C2000 F280039C LaunchPad development kit,
URL: <http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F280039C>.
- [6] TI C2000 Delfino MCU F28377S LaunchPad development kit,
URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/sprui25>.
- [7] TI C2000 Delfino MCU F28379D LaunchPad development kit,
URL: <http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28379D>.
- [8] TI C2000 F28P550SJ9 LaunchPad development kit,
URL: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28P55X>.
- [9] TI C2000 F28P650DK9 LaunchPad development kit,
URL: <https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28P65X>.
- [10] TI C2000 F280039C controlCARD evaluation module,
URL: <https://www.ti.com/tool/TMDSCNCD280039C>.
- [11] TI C2000 F28379D controlCARD development kit,
URL: <https://www.ti.com/tool/TMDSCNCD28379D>.
- [12] TI C2000 F28388D controlCARD evaluation module,
URL: <https://www.ti.com/tool/TMDSCNCD28388D>.
- [13] PLECS TI C2000 Target Support User Manual,
URL: <https://www.plexim.com/download/documentation>.
日本語版: <https://adv-auto.co.jp/products/plexim/manual.html>

改訂履歴:

C2000 TSP 1.2	初版
C2000 TSP 1.3.1	ハーフブリッジLLC共振コンバータパワー素子モジュールのアサーションをオン
C2000 TSP 1.4.5	Webリンクを更新
C2000 TSP 1.5.1	28388Dおよび28379D controlCARDターゲットのサポートを追加
C2000 TSP 1.6.1	280039C LaunchPadおよびcontrolCARDターゲットのサポートと自動ピン選択を追加
C2000 TSP 1.9.1	28P550SJ9 LaunchPadターゲットのサポートを追加
C2000 TSP 1.11.1	PlantをNanostepソルバにアップグレード

 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。