

Embedded Code Generation *DEMO MODEL*

Current Source Inverter

電流源インバータ

- TI C2000 MCUからの組み込みコード生成を使用した、抵抗負荷と開ループコントローラを備えた電流源インバータ -

Last updated in C2000 TSP 1.8.1

1 はじめに

電流源インバータ(Current Source Inverter: CSI)は、短絡状態なしに大電流に耐えることができ、永久磁石同期機(Permanent Magnet Synchronous Machine: PMSM)のステータ巻線に対して低い dv/dt 電圧を示すため、高出力ドライブに一般的に使用されます[1] [2]。電流型の空間ベクトルパルス幅変調(Space Vector Pulse-Width Modulation: SVPWM)を使用するCSIの制御信号シーケンスは包括的であり、特に高電力レベルで動作する場合、実際のハードウェアターゲット上で直接デバッグするのは困難です。HILシミュレーションは、CSIの動作をリアルタイムでエミュレートし、制御ユニットに対して仮想ターゲットを提供できます。この方法により、CSI制御と特殊なPWMペリフェラルの構成を安全な環境でテストできます。

CSIのリアルタイム対応シミュレーションモデルを作成する際の課題は次のとおりです:

- スイッチングコンポーネント数:** コンバータに n 個の独立したスイッチがある場合、状態空間記述の数は 2^n で指数的に増加します[3]。すべてのリアルタイムシミュレーションプラットフォームでは、計算された状態空間行列を格納するためのメモリ容量に制限があるため、一定の固定ステップサイズ内でシミュレートできるトポロジの規模には厳しい制限が課せられます。
- シミュレーション精度:** 強制整流電力コンバータをシミュレートし、制御用PWM信号をシミュレーションステップごとに1回サンプリングする場合、パルスがシミュレーションステップと自然には一致しないため、シミュレーションが不正確になる可能性があります。この制限は、個々の理想スイッチの代わりにハイブリッドコンバータモデルを利用するサブサイクル平均化[4] [5]という概念を用いることで克服できます。しかし、CSIはDC側では電流源として、位相側では電圧源として振る舞うため、PLECSライブラリの既存のパワー素子モジュールでは実装できません。これは従来の電圧源ハーフブリッジとは逆の動作です([5]のFig. 1を参照)。
- 実行時間:** 前述の"スイッチング コンポーネント数"で述べたように、モデル内の独立したスイッチの数が多いほど、リアルタイム計算に要する時間が長くなり、固定ステップサイズも大きくなります。ただし、ステップサイズが大きくなるほど、スイッチング波形のスペクトル分解能は低くなります。リアルタイムプラットフォームで動作するCSIモデルの性能を向上させるために、各相レッグごとに個別にモデル化するのではなく、3相CSIを1つのパワーモジュールとしてモデル化します。

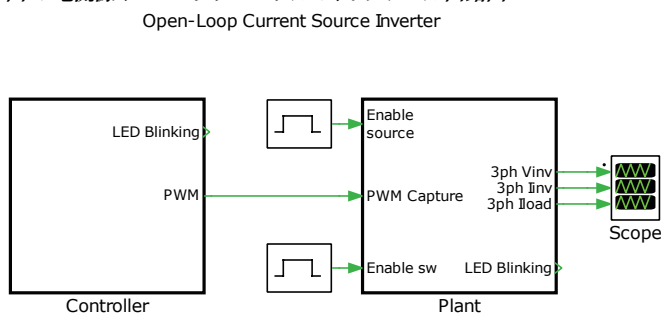
このデモモデルでは、PLECS RT Boxにリアルタイムでデプロイされる CSI用のパワーモジュールを紹介します。コントローラと変調器はTexas Instruments C2000 MCU上に実装されており、組み込みコードはPLECS TI C2000 Target Support Packageを用いて、このPLECSデモモデルから直接生成されています。

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*

図1: 電流源インバータデモモデルのトップレベル回路図



2 モデル

最上位レベルの回路図には、[図1](#)に示すように、"Controller"と"Plant"モデルを表す2つのサブシステムが含まれています。両方のサブシステムは、**編集メニューからサブシステム -> 実行の設定...**により、から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。最上位レベルの2つのenable/disableブロックは、コンバータのDC電流源とスイッチング動作を有効化および無効化する信号を実装します。同様の動作はLaunchpadインタフェースボード上のDIPスイッチを使用して、モデルのリアルタイムセットアップで実現できます。[第3章](#)を参照してください。

2.1 Plant

電流型のSVPWM変調によるCSIの性能に焦点を当てるために、[図2](#)のRL負荷によるCSIの簡略化されたアプリケーション例を使用します。電気的仕様は[表1](#)に記載しています。CSIの基本的な動作は、位相出力電流の基本波が正弦波状に変化するようスイッチを駆動することです。最も一般的に使用される変調方式は、電流型のSVPWMです。

図2: 対称RL負荷を備えた電流源インバータの電源回路

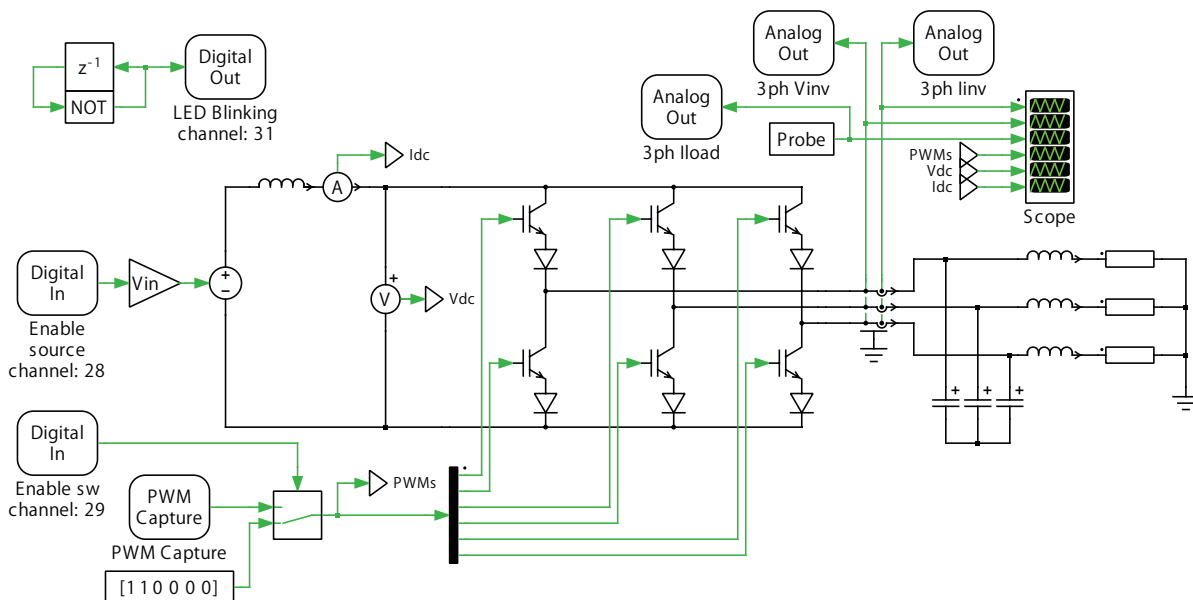


表1: CSIシステム仕様

V_{in}	I_{in}	L_{in}	C_f	L	R	P_o	f_{sw}
400V	25A	2mH	4.8 μ F	250 μ H	16 Ω	10kW	20kHz

CSIパワーモジュール

このセクションでは、CSI用のパワーモジュール([図3](#))の解析結果を示します。パワーモジュールの構造を[図4](#)に示し、灰色の領域は数値モデルの計算範囲を示しています。[図4](#)の左側は外部DC電流源に接続されており、電流はDC+端子に流入し、DC-端子から流出します。DC側の電流は誘導性または電流源の挙動を示すため、電流計で測定します([図4](#)の i_{dc})。各相レッグにはダイオードと直列にIGBTを接続しているため、各相レッグにおける電流の方向は一意的に制限されます。瞬間位相電圧空間ベクトルが12セクタのうち、どのセクタに位置するかによって、6つのダイオードのスイッチング状態が決定されます。

図3: 電流源インバータのスイッチングモデル

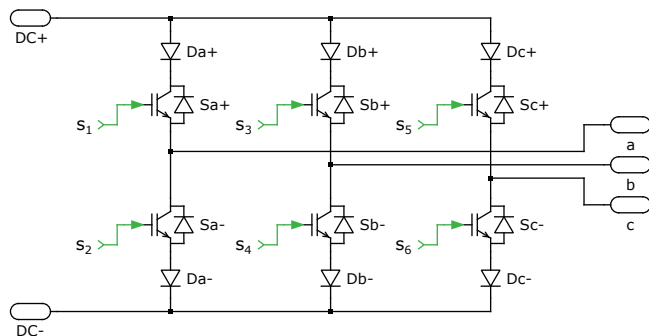
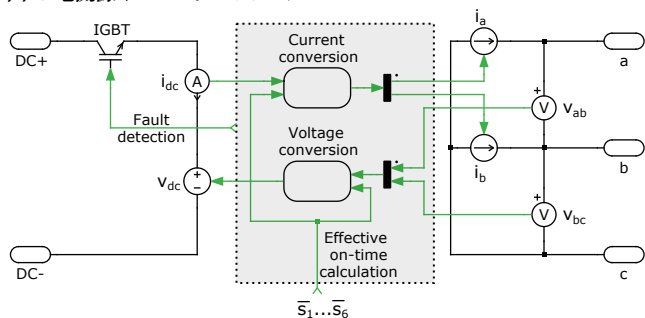


図4: 電流源インバータモジュール



時間平均スイッチング信号(\bar{s}_1^* から \bar{s}_6^*)と組み合わせて、6つの相レッグ電流(\bar{s}_1 から \bar{s}_6)の実効オン時間を導出できます。CSIパワーモジュール内のダイオードの自然転流を含むことで、システムモデル全体のコード生成プロセスを簡素化できます。

右側では、A相とB相のインバータ電流が電流源(可変)(図4の i_a と i_b)としてモデル化されています。値は、DC側で測定した電流と各相レッグの有効オン時間に基づく次の式から計算できます:

$$i_a = i_{dc} \cdot (\bar{s}_1^* - \bar{s}_2^*)$$

$$i_b = i_{dc} \cdot (\bar{s}_3^* - \bar{s}_4^*)$$

従来のCSIトポロジには中性点接続がないことに注意してください。3つのスター接続された相電流の合計は0になるため、すべての相電流を完全に決定するには2つの電流源で十分です。第三の電流源を使用すると、"ソース条件の不一致"となります。

DC側電圧は、測定したAC側相間電圧(v_{ab} と v_{bc})と有効オン時間 \bar{s}_1^* から \bar{s}_6^* に基づいて、次の式に従って電圧源(可変)(v_{dc})としてモデル化されます:

$$v_{dc} = \frac{1}{3} \cdot ((\bar{s}_1^* - \bar{s}_2^* + \bar{s}_4^* - \bar{s}_3^*) \cdot v_{ab} + (\bar{s}_3^* - \bar{s}_4^* + \bar{s}_6^* - \bar{s}_5^*) \cdot v_{bc} - (\bar{s}_5^* - \bar{s}_6^* + \bar{s}_2^* - \bar{s}_1^*) \cdot (v_{ab} + v_{bc}))$$

CSIパワーモジュールでは障害検出方式も考慮しています。IGBT(図4を参照)は、電流を維持するための閉じた経路が存在しない場合、外部DC電流源と直列接続された状態でオフになります。この計算は、図4の灰色領域内で、時間平均化されたスイッチング信号(\bar{s}_1 から \bar{s}_6)に基づいて実施されます。これはつまり:

$$\bar{s}_1 + \bar{s}_3 + \bar{s}_5 > 1$$

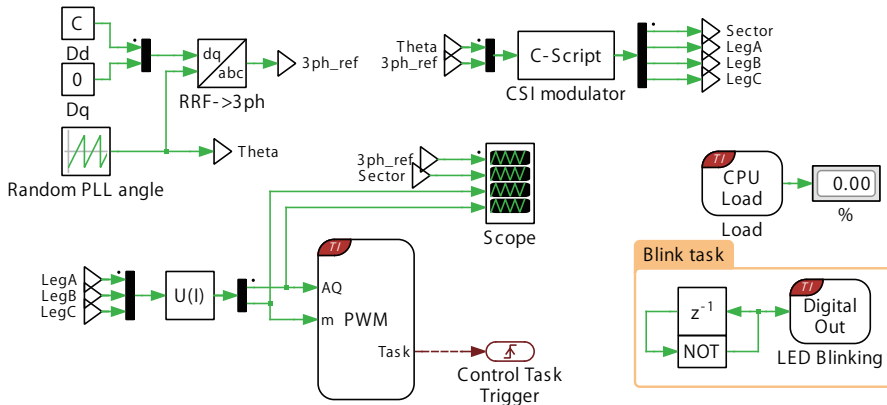
$$\bar{s}_2 + \bar{s}_4 + \bar{s}_6 > 1$$

シミュレーション中は常にこの条件を満たす必要があります。そうでない場合、デスクトップPLECSシミュレーションまたはRT Boxのいずれかが停止し、エラーが発生します。

2.2 Controller

"Controller"サブシステムを図5に示します。インバータは受動的なRL負荷であるため、インバータのランダムPLL角度が生成されます。次に、abcdメインのインバータ電流リファレンスが生成され、CSI変調器に供給されます。

図5: RL負荷付きCSIの開ループコントローラモデル



CSI変調器はC言語入力ブロックで実装し、各スイッチのPWM相対比較値(p.u.単位)とそのアクション修飾子値を計算します。これらの信号はPWMブロックに渡されます。このPWMブロックの**Output**タブでは、**Mode**はSingle output (channel A)であり、6つのPWMモジュールそれぞれについてActive state as logic '1'設定となっています。**Sequence!**はVariable AQ (expert mode)に設定されます。

PWMブロックの**AQ**入力ポートは、入力される変動値を取得し、MCU上のEPWMモジュールの16ビット**AQCTLA**レジスタに書き込みます。これにより、コンパレータ値で発生する比較イベントに対するPWMアクション(SetまたはClear)を直接制御します。以下の2つの表に、CSIのPWM生成におけるAQCTLAレジスタ内の重要なビット値をまとめています。

表2: 正のPWMロジックのAQCTLAレジスタビット値

Bit position	7-6	5-4	3-2	1-0
Functionality	CAD = '10' (Set)	CAU = '01' (Clear)	PRD = '00' (Do nothing)	ZRO = '00' (Do nothing)

表3: 負のPWMロジックのAQCTLAレジスタビット値

Bit position	7-6	5-4	3-2	1-0
Functionality	CAD = '01' (Clear)	CAU = '10' (Set)	PRD = '00' (Do nothing)	ZRO = '00' (Do nothing)

さらに、このタイプのCSIに必要なスイッチ間のライブタイムは、CSI modulatorのC言語入力でコンパレータ値を直接操作することで確保されるため、PWMブロックの**Dead time**フィールドは0になります。

CSI変調方式

CSIの変調方式は、電流型のSVPWM方式を用いた電流源整流器(降圧整流器とも呼ばれる)の変調方式と非常によく似ています。唯一の違いは、降圧整流器は外部のフリーホイールダイオードを通じてフリーホイール状態を実現できるのに対し、CSIはDC電流をフリーホイールさせるために1つの位相で上下両方のスイッチの両方を閉じる必要があることです。

各スイッチング状態のドウェル時間が決まったら、1つのスイッチング周期内でスイッチング状態のシーケンスを配置する方法はいくつかあります。降圧整流器の対称変調方式は、[6]のFig. 4 “Method 1”で詳細に分析されています。この変調方式は[6]と[7]によるとフィルタキャパシタの電圧リップルが小さいため、このデモのCSIに実装された変調シーケンスとして選択されています。図6は、セクタ1(相中間電圧 $v_a > 0 > v_b > v_c$)における4つのアクティブスイッチのゲート信号を示しています。

図6: セクタ1におけるCSIのスイッチング信号シーケンス

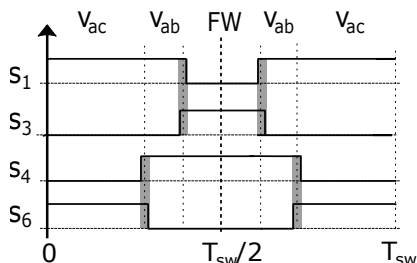
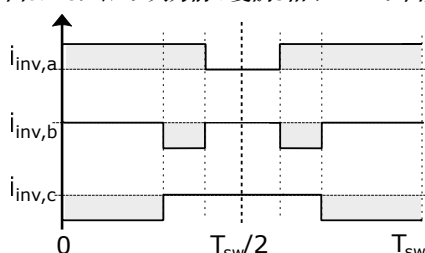


図7: LCフィルタ入力前の変調3相インバータ出力電流



S_{a+} と S_{b+} 、 S_b と S_c は同じコンパレータ値でまったく反対のPWMロジックを持っていることがわかります。セクタ1で常にオフになっている信号はここには表示されないことに注意してください。図7はセクタ1の3相端子における対応する変調インバータ出力電流を示しています。これらのPWM形状のインバータ電流は、後でLCフィルタでフィルタリングし、スイッチング期間の平均電流値を得ます。したがって、抵抗負荷電流は三相正弦波状になります。

3 シミュレーション

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 28379D [8] LaunchPadとTI 28388D [9] controlCARDをサポートしています。

さらに、デモモデルでは、TI 28377S [10] LaunchPadとTI 28379D [11] controlCARD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 パラメーター... -> 初期化タブの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。

一般的なHIL構成を図8に示します。ここでは、評価キットであるTI 28379D LaunchPad(赤いボード)が、RT Box LaunchPad インタフェース(緑のボード)を介してRT Boxに接続されています。

3.1 ビルド手順と操作の有効化

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ケーブルを介して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。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。
- ビルド後、**Coderオプション**ウィンドウの**外部モード**タブから、MCUに**接続**し、**自動トリガを有効化**にチェックし、テスト結果をリアルタイムで観察します。
- **自動トリガを有効化**をクリックすると、このデモ モデルでは**ターゲットチャンネル**が[CSI modulator:1]に事前設定されます。これはインバータのセクタ番号を示します。
- ここでは**間引き**が5に設定されており、設定されたサンプル数で1ライン周期のリアルタイムの波形を見ることができます。

正しくプログラムされていれば、LaunchPadの赤色LED "D9"が点滅します。

注意 RT Box LaunchPadインタフェースボードを使用する場合は、シミュレーション中は**RST**ジャンパがオープンなことを確認してください。

図8: HIL検証のハードウェアセットアップ



RT Box上でリアルタイムの"Plant"モデルを実行するには、以下の手順に従ってください:

- **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、RT Boxに**ビルド**します。
- モデルがアップロードされたら、**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。
- **自動トリガを有効化**をクリックすると、**ターゲットチャンネル**を特定の信号に設定できるため、PLECSスコープ上の実行中の波形は**ターゲットレベル**、**ターゲット遅れ(steps)**、**感度**条件によってより安定してトリガされるようになります。このデモモデルでは、[R4:Resistor current]に特定のトリガ条件が事前に設定されており、リアルタイムシミュレーション波形をPLECSオフラインシミュレーション上に同期してオーバーレイできます。

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

- RT Box LaunchPadインタフェースボード上のスイッチ"DI-29"を"Low"から"High"に切り替えて、MCUからのアクティブなPWM信号のキャプチャを有効にします。スイッチ"DI-29"を"High"から"Low"に戻すと、A相の上部と下部のレッグのみがオンになり、他のすべてのスイッチがオフになる、安全なオフ状態になります。

- RT Box LaunchPadインタフェースボード上のスイッチ"DI-28"を"Low"から"High"に切り替えて、"Plant"サブシステムのDC電圧源を定格入力電圧に有効化します。スイッチ"DI-28"を"High"から"Low"に戻すと、DC電圧源は無効になります。
- 最初に"DI-29"を"High"に、次に"DI-28"を"High"に切り替えると、通常の動作モードでCSIが有効になります。
- CSI操作を停止するには、まず"DI-28"を"low"に、次に"DI-29"を"low"に切り替えます。

RT Box上で実行される"Plant"サブシステム内では、シミュレートされた電圧と電流が比例してアナログ信号に変換され、RT Boxの前面パネルのAnalog Outコネクタを通じて送信されます。これらのアナログ信号は、RT Box LaunchPadインタフェースボードによってキャプチャされ、TI LaunchPadのADC入力ピンにルーティングされます。このデモではCSIが開ループ動作で示されているため、"Controller"サブシステムではADCブロックを使用していないことに注意してください。実際の閉ループアプリケーションでは、MCUがこれらのアナログ信号を処理してPWMスイッチング信号を生成し、Digital Inピンを介してRT Boxに供給します。

3.2 PLECSオフラインとリアルタイムシミュレーションの結果

PLECSシミュレーションの結果をリアルタイムシミュレーション波形と比較するには、事前にPLECSオフラインシミュレーションを実行し、そのトレースを"Plant"サブシステム内のPLECSスコープに保持しておく必要があります。インバータの相電流、線間相電圧、負荷電流のシミュレーション結果を図9の破線波形で示します。RL負荷では対称的な3相正弦波電流が観察されます。

左側の拡大図は、位相電圧セクタが12から1に変化する周辺の複数のスイッチング期間に焦点を当てています。セクタ1での1回のスイッチング周期では、破線波形で生成された6つの理想的なPWM信号(上から下に s_1 から s_6)が、[図6](#)に示すシーケンスに対応していることがわかります。右側の拡大図は、 $v_b > 0 > v_c > v_a$ のセクタ5における、正確に1スイッチング周期($T_{sw} = 1/20 \text{ kHz} = 50\mu\text{s}$)の位相Aの詳細波形を示しています。どちらの拡大図でも、理想的にスイッチングされた電流と電圧を伴う理想的なゲート信号を確認できます。

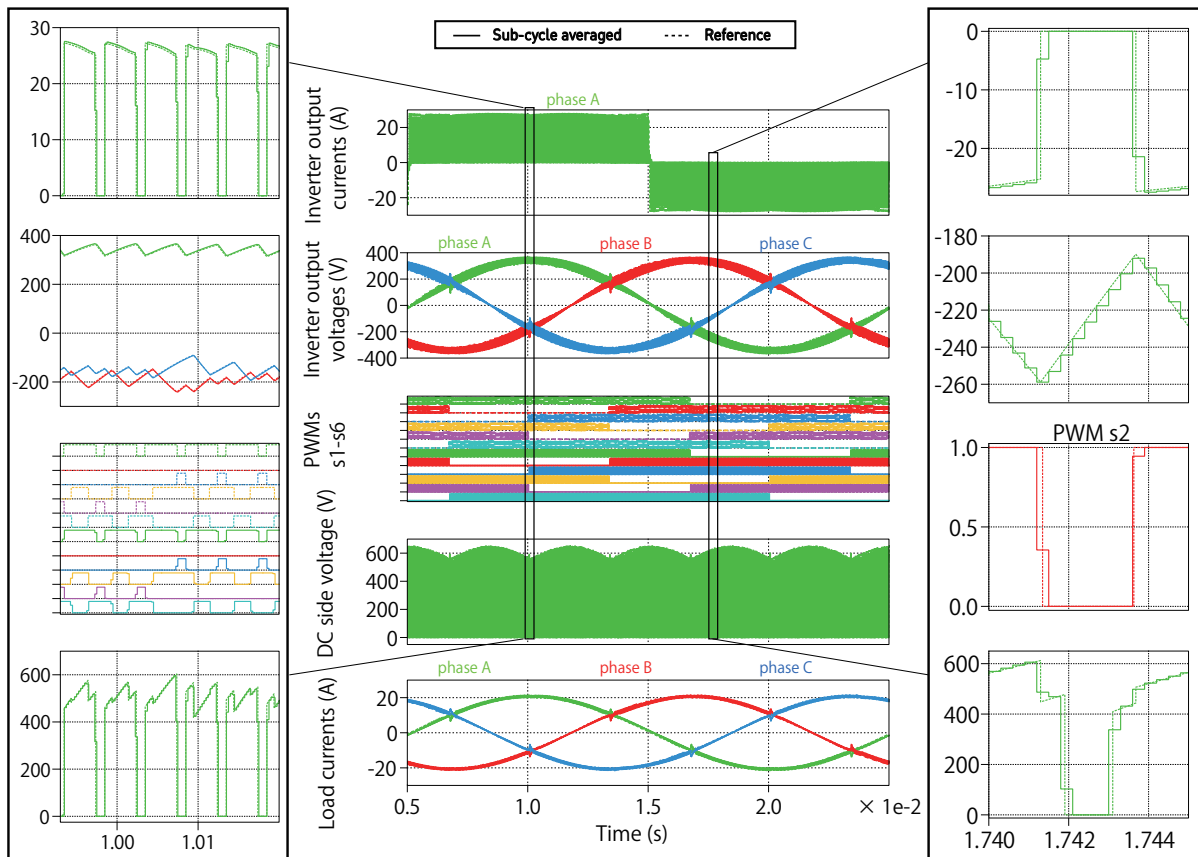
次に、前述の手順に従ってリアルタイムシミュレーションを実行します。両方のリアルタイムターゲットが実行されたら、RT Boxに接続して自動トリガを有効化し、ターゲットチャンネルには事前に設定されたトリガポイント[R4: Resistor current]が選択されます。[図9](#)では、リアルタイムシミュレーションの波形が実線で表示し、可変ステップサイズソルバを使用したPLECSオフラインシミュレーションの参照波形(破線)と重ねて比較しています。リアルタイムシミュレーションの結果は、参照波形と非常によく一致しています。

"Plant"モデルは、固定ステップサイズ $T_{disc.plant} = 2.5\mu\text{s}$ で離散化されます。生成されたCコードはPLECS RT Box上に構築され、リアルタイムステップごとに平均 $2\mu\text{s}$ の実行時間を要します。"Controller"モデルは、スイッチング周期に等しい時間ステップでMCU上で実行されます。つまり、 $T_{disc.ctrl} = 50\mu\text{s}$ となります。外部モードに接続している場合、MCUの割り込み実行時間は、"Controller"モデル内のCPU Loadブロックによって動的に表示され、約20%になります。

PLECSオフラインシミュレーションとリアルタイムシミュレーションの波形の両方において、セクタ境界付近のインバータ出力電圧のわずかな歪み([図9](#)の左側の拡大図を参照)が観察されることに注意してください。これは、セクタ境界でのアクション選択出力制御レジスタ(Action Qualifier Control register)のロジックの変更によるものです。さらに、これはPWMブロックの高い忠実度を示しており、オフラインシミュレーションにおける挙動がMCUに書き込まれたコードの結果と比較して、同一であることを示しています。

実際、[\[12\]](#)のFig. 7(b)で提案されている高度な変調方式は、この問題を軽減するためにすでにコントローラモデルに実装されています。しかし、[\[12\]](#)のFig. 9で提案されているように、セクタを横切る瞬間のPWMパターンの特別な処理は、自動組み込みコード生成を備えたコントローラモデルでは簡単に実装できません。

図9: PLECSシミュレーションとRT Boxリアルタイムシミュレーションの実験結果の比較



4 まとめ

このモデルは、TI C2000 MCUの組み込みコード生成をサポートする電流源インバータを示しています。オフラインシミュレーションまたはリアルタイムの両方で実行できます。デモモデルは、以前に発表された会議論文[13]に基づいています。

5 参考文献

- [1] M. Salo and H. Tuusa, "Vector-controlled PWM current-source-inverter-fed induction motor drive with a new stator current control method", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 2, pp. 523-531, April 2005.
- [2] S. A. Richter, B. Bader and R. W. De Doncker, "Control of a high power PWM current source rectifier", *2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA*, June 2010, pp. 1287-1292.
- [3] J. Allmeling and W. Hammer, "PLECS – piece-wise linear electrical circuit simulation for Simulink", *Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems. PEDS'99 (Cat. No.99TH8475)*, vol. 1, July 1999, pp. 355-360.
- [4] J. Allmeling and N. Felderer, "Sub-cycle average models with integrated diodes for real-time simulation of power converters", *2017 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, Dec 2017, pp. 1-6.
- [5] J. Allmeling, N. Felderer and M. Luo, "High Fidelity Real-Time Simulation of Multi-Level Converters", *2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia)*, May 2018, pp. 2199-2203.

- [6] M. Baumann, T. Nussbaumer and J. W. Kolar, “Comparative evaluation of modulation methods of a three-phase buck + boost PWM rectifier. Part I: Theoretical analysis”, *IET Power Electronics*, vol. 1, no. 2, pp. 255-267, June 2008.
- [7] T. Nussbaumer, M. Baumann and J. W. Kolar, “Comparative evaluation of modulation methods of a three-phase buck + boost PWM rectifier. Part II: Experimental verification”, *IET Power Electronics*, vol. 1, no. 2, pp. 268-274, June 2008.
- [8] TI C2000 Delfino MCU F28379D LaunchPad development kit,
URL: <http://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28379D>.
- [9] TI C2000 F28388D controlCARD evaluation module,
URL: <https://www.ti.com/tool/TMDSCNCD28388D>.
- [10] TI C2000 Delfino MCU F28377S LaunchPad development kit,
URL: <https://www.ti.com/lit/pdf/sprui25>.
- [11] TI C2000 F28379D controlCARD development kit,
URL: <https://www.ti.com/tool/TMDSCNCD28379D>.
- [12] T. Nussbaumer and J. W. Kolar, “Improving Mains Current Quality for Three-Phase Three-Switch Buck-Type PWM Rectifiers”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 4, pp. 967-973, July 2006.
- [13] S. Zhao, N. Felderer and J. Allmeling, “Real-Time Simulation of Three-Phase Current Source Inverter using Sub-Cycle Averaging Method,” 2020 IEEE 21st Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), Aalborg, Denmark, Nov. 2020, pp. 1-6.

改訂履歴:

C2000 TSP 1.2.3	初版
C2000 TSP 1.3.1	broken-from-lib PWM(CSI)ブロックを更新
C2000 TSP 1.5.1	TI 28377S LaunchPad、TI 28388Dおよび28379D controlCARDターゲットのサポートを追加し、コントローラでの倍精度演算の使用を最小限に抑えた
C2000 TSP 1.6.1	自動ピン選択を追加
C2000 TSP 1.8.1	broken-from-lib PWM (CSI)ブロックを、更新されたライブラリリンクPWMブロックに置き換え

 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

 計測エンジニアリングシステムへの連絡方法:

☎ +81 3 6273 7505 Phone

+81 3 6285 0250 Fax

✉ Keisoku Engineering System CO.,LTD. Mail

1-9-5 Uchikanda, Chiyoda-ku
Tokyo, 101-0047
Japan

<https://kesco.co.jp> Web

Embedded Code Generation Demo Model

© 2002–2023 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。